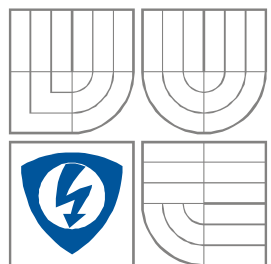


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODELOVÁNÍ A OPTIMALIZACE ŠROUBOVICOVÉ ANTÉNY

Design and optimization of the helical antenna

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Lenka Zelinková

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Lenka Zelinková
Bytem: Jírovcova 15, Brno, 623 00
Narozen/a (datum a místo): 18. září 1985 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Modelování a optimalizace šroubovicové antény

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☐ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☐ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 4. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Modelování a optimalizace šroubovicové antény jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4. června 2008

.....
podpis autora

Abstrakt

Obsahem práce je návrh šroubovicových antén pro zadané kmitočty. Teoretický návrh je ověřen v kalkulátorech parametrů. Ověření vlastností návrhu proběhlo v počítačovém simulátoru CST Microwave studio, ve kterém byly antény také optimalizovány na maximální zisk. K anténám určeným jako ozařovače parabol jsou navrženy paraboly a ohniskové vzdálenosti, ve kterých budou antény vůči parabolám umístěny. K anténám je navrženo impedanční přizpůsobení čtvrtvlnným transformátorem.

Abstract

The thesis contains the design of helical antennas for the assigned frequencies. The theoretical design is verified by parameter calculators. The design properties were verified in the computer simulator CST Microwave studio where the antennas were optimized to the maximum gain. The antennas intended as parabola feeds are completed with the designs of parabolas and focal distances between the antennas and the parabolas. Impedance matching by a quarter-wave transformer is designed for the antennas.

Klíčová slova

Anténa, šroubovicová anténa, návrh, CST Microwave studio, primární zářič, parabolická anténa, návrh parabolické antény, impedanční přizpůsobení, čtvrtvlnný transformátor

Key words

Antenna, helical antenna, design, CST Microwave studio, primary exciter, parabolic antenna, design of parabolic antenna, impedance matching, quarter wave transformer

Bibliografická citace

ZELINKOVÁ, L. *Modelování a optimalizace šroubovicové antény*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

Obsah

1 Úvod.....	8
2 Šroubovicová anténa.....	9
2.1 Obecné informace.....	9
2.2 Osový způsob vyzařování.....	10
2.3 Kruhová polarizace.....	10
3 Vlastnosti antén.....	11
3.1 Základní vlastnosti antén.....	11
3.2 Vstupní impedance.....	11
3.3 Vyzařovací charakteristika.....	11
3.4 Směrnost, šířka hlavního laloku a činitel zpětného záření.....	12
3.5 Zisk antény.....	12
3.6 Účinnost antény.....	12
4 Impedanční přizpůsobení.....	13
4.1 Impedance šroubovicové antény.....	13
4.2 Transformace impedance.....	13
4.3 Čtvrtvlnný transformátor.....	13
5 Parabolické antény.....	14
5.1 Obecné informace.....	14
5.2 Šroubovicová anténa jako ozařovač paraboly.....	15
6 Teoretický návrh.....	16
6.1 Návrh antény pro $f=1,6\text{GHz}$	16
6.2 Ověření parametrů pro $f=1,6\text{GHz}$, $N=10$	16
6.3 Návrh antény pro $f=2,45\text{GHz}$	18
6.4 Ověření parametrů pro $f=2,45\text{GHz}$, $N=10$	18
6.5 Návrh antény pro $f=5,656\text{GHz}$	20
6.6 Ověření parametrů pro $f=5,656\text{GHz}$, $N=10$	20
7 Návrh impedančního přizpůsobení.....	22
7.1 Návrh čtvrtvlnného transformátoru.....	22
7.2 Návrh transformátorů impedance.....	22
8. Simulace v CST Microwave studio.....	24
8.1 Simulace pro $f=1,6\text{GHz}$	24
8.2 Simulace antény s impedančním přizpůsobením pro $f=1,6\text{GHz}$	25
8.3 Simulace pro $f=2,45\text{GHz}$	26
8.4 Simulace antény s impedančním přizpůsobením pro $f=2,45\text{GHz}$	28
8.5 Simulace pro $f=5,656\text{GHz}$	30
8.6 Simulace antény s impedančním přizpůsobením pro $f=5,656\text{GHz}$	31
8.7 Zhodnocení návrhu.....	32
9 Návrh paraboly se šroubovicovým ozařovačem.....	34
9.1 Úprava a návrh antény pro $f=1,6\text{GHz}$	34
9.2 Úprava a návrh antény pro $f=2,45\text{GHz}$	35
9.3 Úprava a návrh antény pro $f=5,656\text{GHz}$	37
10 Ověření návrhu.....	39
10.1 Ansoft HFSS.....	39
10.2 4nec2x.....	39
11 Měření reálných antén.....	41
11.1 Realizace.....	41

11.2 Měření.....	43
12 Závěr.....	45
13 Literatura.....	46
13.1 Publikace.....	46
13.2 Elektronické zdroje.....	46
14 Seznam použitých zkratek a symbolů.....	48

1 Úvod

Mým úkolem bylo seznámit se v průběhu tří semestrů s vlastnostmi šroubovicových antén, teoreticky navrhnout anténu zadaných parametrů, v programu CST Microwave Studio vytvořit model navržené antény, provést simulace a na jejich základě optimalizace, anténu nechat vyrobit a měřením na reálné anténě ověřit teoretické předpoklady.

V prvním semestru jsem shromáždila literaturu týkající se šroubovicových antén, impedančního přizpůsobení antén a metody měření základních charakteristik antén. Literaturu týkající se šroubovicových antén a impedančního přizpůsobení antén jsem prostudovala a na základě takto získaných poznatků jsem teoreticky navrhla tři šroubovicové antény pro různé kmitočty podle pokynů vedoucího projektu.

Ve druhém semestru jsem se seznámila s prostředím programu CST Microwave studio, ve kterém jsem vytvořila model šroubovicových antén. Tento model jsem upravovala pro zadané kmitočty a optimalizovala na maximální zisk vyzařovaný hlavním lalokem směrové charakteristiky při maximálně potlačených bočních lalocích. Získané antény jsem porovnála s teoretickým návrhem z minulého semestru.

Prostudovala jsem vlastnosti parabolických antén a jejich primárních zářičů. Antény navržené v minulém semestru jsem upravila aby vyhovovaly vlastnostem primárních zářičů ozařujících parabolickou anténu. K těmto anténám jsem navrhla parametry paraboly a ohniskové vzdálenosti ve kterých budou proti parabole umístěny.

K anténám jsem navrhla pro teoretickou hodnotu $R=140\Omega$ impedanční přizpůsobení. Ke každé anténě jsem pak navrhla přizpůsobení na její simulací zjištěnou impedanci. Pro transformaci impedance byl zvolen čtvrtvlnný transformátor. Toto přizpůsobení jsem odsimulovala a optimalizovala na začátku třetího semestru.

Ve třetím semestru jsem anténu vyrobila a měřením jsem ověřila výsledky simulace.

2 Šroubovicová anténa

2.1 Obecné informace

Vlastnosti šroubovicové antény popsal Američan John D. Kraus (28.6.1910–18.7.2004) [21].

Šroubovicová anténa se skládá z jednoho nebo více vodičů stočených do tvaru šroubovice. Tvar vyzařovacího diagramu se nejčastěji používá osový, dále pak normálový nebo kuželový. Tvar vyzařovacího diagramu je určen převážně tvarem šroubovice. Pokud je velikost antény malá oproti vlnové délce, vyzařovací diagram bude mít tvar normálový. V případě že délka obvodu antény a vlnová délka budou srovnatelné, nastane osový průběh a jestliže bude délka obvodu antény větší než vlnová délka, bude průběh kuželový. Více v [1], [5] a [11].

Parametry šroubovicové antény jsou:

D ...průměr šroubovice (mezi středy vodičů)

C ...obvod šroubovice ($C = \pi \cdot D$) (1)

S ...vzdálenost mezi závity (středy vodičů)

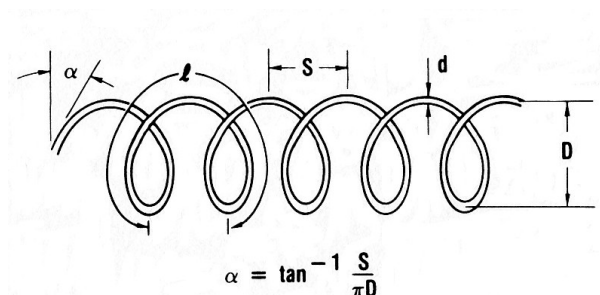
α ...úhel stoupání ($\alpha = \arctg(S/C)$) (2)

N ...počet závitů

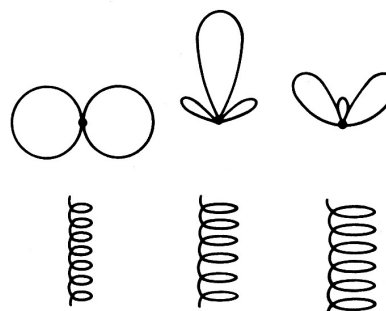
L ...osová délka ($L = N \cdot S$) (3)

d ...průměr vodiče

l ...délka jednoho závitu ($l = \sqrt{C^2 + S^2}$) (4)



Obr. 1: Parametry Šroubovicové antény, převzato z [5]



a)Osový b)Normálový c)Kuželový

Obr. 2: Způsoby vyzařování, převzato z [5]

Anténa může být navržena jako pravotočivá (přijímá nebo vysílá pravotočivý kruhově polarizovaný signál), nebo levotočivá (přijímá nebo vysílá levotočivý kruhově polarizovaný signál). Šroubovice může být navinuta vodičem s kruhovým nebo plochým průřezem.

Šroubovicové antény jsou obecně navrženy s jednotným průměrem a jsou opatřeny zemní deskou. Nejednotností průměru však můžeme docílit zlepšení šířky pásma vyzařovací výkonové charakteristiky. Složitější antény mohou být navrženy také se dvěma jednotnými průměry nebo kombinací jednotné a zužované sekce. Takovéto antény mohou mít lepší šířku pracovního pásma a lepší zisk.

Místo zemní plochy je možné použít reflektor pro omezení zpětného záření a zlepšení předního zisku.

2.2 Osový způsob vyzařování

Tvar vyzařovacího diagramu do osového (axiálního) tvaru je nejčastěji v praxi využívaným způsobem vyzařování antény. Osový způsob vyzařování antény vykazuje pokud je délka obvodu antény velikostí srovnatelná s požadovanou přijímanou nebo vysílanou vlnovou délkou signálu. Při tomto způsobu vyzařování je maximum výkonu antény vyzařováno ve směru osy šroubovice. Viz [5] a [13].

Vyzařovací diagram je dán přibližně vztahem

$$E(\theta) = A \cdot \frac{\sin(N\Psi/2)}{\sin(\Psi/2)} \cos(\theta) \quad (5)$$

$$\text{kde } \Psi = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot S \cos \theta - \delta, \quad (6)$$

θ je úhel měření od osy šroubovice.

A je normalizační koeficient daný vztahem $A = \sin(\pi/2N)\delta$, (7)

δ je fáze mezi závity dána vztahem $\delta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{l}{p}$. (8)

Fázová rychlost $p = \frac{v}{c}$, (9)

l je délka jednoho závitu,

v je rychlost šíření vlny podél šroubovice a

c je rychlost světla ve vzduchu ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$).

Polarizace vyzařovaného pole je obecně eliptická, je-li ale N dost velké, blíží se osový poměr AR jedné a polarizace je kruhová

$$AR = \frac{(2N+1)}{2N}. \quad (10)$$

Zúžením dlouhé ($N > 10$) šroubovicové antény lze docílit rozšíření šířky pásma vyzařovací charakteristiky. Zúžení může být plynulé po celé délce antény nebo skokově měněné.

Zúžením posledních dvou závitů šroubovice docílíme rozšíření šířky pásma vyzařovací charakteristiky, ale snížíme maximální zisk antény.

2.3 Kruhová polarizace

Vektor intenzity elektrického pole $E = E_x x + E_y y$. Je-li směr vektoru E libovolný, můžeme jej rozdělit na dvě vzájemně kolmé složky. Pokud je $E_x = 0$, je vlna popsána rovnicí $E = E_y y$ a říkáme, že je polarizovaná vertikálně. Pokud je $E_y = 0$, je vlna popsána rovnicí $E = E_x x$ a vlna je polarizovaná horizontálně. Složky vektoru E mohou mít různé amplitudy i fáze, musí ale mít stejnou frekvenci, vlnovou délku a fázovou rychlost, viz [21] a [17].

Pokud mají obě složky stejnou amplitudu a fázi, jejich fázový rozdíl je roven $\pi/2$ a jejich úhel s rovinou xz je proměnný v čase i prostoru, polarizace je kruhová. Rovnice takové vlny jsou

$$E_x = A_E \cdot \cos(\omega t - kz), \quad (11)$$

$$E_y = \pm A_E \cdot \sin(\omega t - kz). \quad (12)$$

Při konstantním z se vektor E otáčí úhlovou rychlostí ω okolo osy šíření vlny. Jeho konec se pohybuje po kružnici o poloměru A_E , při šíření vlny opisuje šroubovici.

$$E_x^2 + E_y^2 = A_E^2. \quad (13)$$

Na dráze rovné délce vlny se otočí vektor E právě jednou dokola.

3 Vlastnosti antén

3.1 Základní vlastnosti antén

Pro popis uvažujeme každou anténu jen jako vysílací, což je výhodnější vzhledem k tomu, že základní parametry jsou pro vysílací i přijímací antény stejné (princip reciprocity). Více viz [7], [8] a [18].

Základní elektrické vlastnosti antén jsou vstupní impedance, šířka pásma, zisk, účinnost a směrovost antény, které jsou blíže určeny vyzařovací charakteristikou (směrovou charakteristikou, diagramem záření) a polarizací.

K těmto parametrům lze přidat ještě množství dalších parametrů, např. šumová teplota antény, které jsou ovšem vyžadovány pouze ve speciálních případech.

3.2 Vstupní impedance

Je definována jako poměr fázorů napětí a proudů na vstupních svorkách antény. Vstupní impedance je obecně komplexní, tzn. skládající se ze dvou částí, a to z reálné části R_{vst} (vstupní odpor) a imaginární části X_{vst} (vstupní reaktance). Imaginární část X_{vst} může mít induktivní nebo kapacitní charakter. Obě složky souvisí s vyzařovacími vlastnostmi vysílací antény a jsou ovlivněny mechanickými vlastnostmi antény, např. délkou prvků, jejich orientací, tloušťkou a okolním prostředím. Více viz [3], [4], [7] a [18].

Hodnota vstupní impedance antény musí být v pracovní oblasti antény shodná s hodnotou charakteristické impedance svého napájecího vedení. Pak je anténa impedančně přizpůsobená. Pokud tomu tak není, dochází v místě spojení k odrazům energie zpět ke zdroji, což způsobuje zhoršení přenosu energie na vstup přijímače. Pro přizpůsobení se zařazují mezi anténu a napájecí vedení přizpůsobovací členy, tzv. impedanční transformátory, které transformují impedanci antény na impedanci vedení (typicky 50Ω).

3.3 Vyzařovací charakteristika

Prostorové rozložení energie vyzážené anténou je určeno vyzařovací charakteristikou. Každá anténa je popsána většinou dvěma vyzařovacími diagramy. Oba znázorňují vlastnosti antény v jedné rovině, a to v rovině E a H , kdy rovina E je rovnoběžná s vektorem elektrického pole a rovina H je na rovinu E kolmá a je rovnoběžná s vektorem magnetického pole, viz [6], [10] a [19].

Charakteristiky se znázorňují v polárních nebo ortogonálních souřadnicích, nebo pomocí 3D zobrazení. Z těchto charakteristik pak můžeme určit další vlastnosti antény, např. šířku hlavního laloku, směrovost, zisk nebo předozadní poměr vyzařování.

V našem případě bude cílem úzký hlavní lalok ve směru záření a potlačení vedlejších laloků na minimum.

Měření vyzařovací charakteristiky se provádí na specializovaných pracovištích v bezodrazových komorách. Zemský povrch, okolní antény a stavby díky odrazům vyzařovací diagram v praxi částečně deformují.

3.4 Směrnost, šířka hlavního laloku a činitel zpětného záření

Mezi parametry popsané pomocí vyzařovací charakteristiky patří směrnost antény, což je schopnost antény přijímat nebo vysílat elektromagnetické vlny s různou intenzitou v závislosti na směru. Číselně vyjádřená je směrnost pomocí tzv. činitele směrnosti, který je větší než jedna ve směrech, do kterých je záření soustředováno a menší než jedna ve směrech, ve kterých je záření potlačováno. Činitel směrnosti izotropního zářiče by byl pro všechny směry roven jedné, viz [4] a [10].

Dalším parametrem je šířka hlavního laloku, což je úhel vymezený směry, ve kterých intenzita pole poklesne o 3dB (na 0,707) vůči maximu.

Činitel zpětného záření udává relativní intenzitu záření ve směru opačném vůči směru maxima.

3.5 Zisk antény

Přední lalok určuje zisk a směrnost antény. Čím je anténa směrovější, tím má delší a štíhlejší přední lalok a ubývají postranní laloky [22].

Vztah mezi činitelem směrnosti D_{max} a ziskem G je dán vztahem

$$G = 10 \cdot \log D_{max} \quad (14)$$

Pokud je činitel směrnosti vyjádřen v jednotce decibel (dB), jedná se o absolutní zisk, pokud je vyjádřen v jednotce vztažného decibelu, jedná se o relativní zisk. Vztažen může být buď k dipólu, potom je jednotka dBd, nebo k izotropické anténě s jednotkou dBi. Přepočet mezi těmito jednotkami udává, že

$$\text{dBi} = 2,15 + \text{dBd} \quad (15)$$

Více viz [4], [7] a [14].

3.6 Účinnost antény

Definuje se poměrem vyzařovaného výkonu k příkonu [4]

$$\eta = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma} + P_{ztr}} = \frac{R_{\Sigma vst} \cdot I_{vst}^2}{R_{\Sigma vst} \cdot I_{vst}^2 + R_{ztr} \cdot I_{vst}^2} = \frac{R_{\Sigma vst}}{R_{\Sigma vst} + R_{ztr}} \quad (16)$$

Dobrá účinnost antény je tedy dána malým ztrátovým odporem nebo velkým odporem záření. Malou účinnost mají antény s malým odporem záření. To jsou většinou antény krátké proti délce vlny.

Čím více má anténa prvků, tím více roste její zisk, účinnost se však snižuje, protože každý prvek má svůj ztrátový odpor, který se přidáním prvku k anténní soustavě promítne do celkového ztrátového odporu. K tomu se také přičítá odpor vlastního vodiče antény, přepočtené dielektrické ztráty v izolaci a také např. ztráty vzniklé indukci v okolních předmětech. Odpor záření je dán typem antény a jejím umístěním nad povrchem země.

Účinnost lze měřením určit pomocí poměru stojatých vln (PSV) a účinnosti Q . Velikost Q je dána poměrem indukčnosti a kapacity antény proti součtu odporu ztrátovému a odporu

vstupnímu.

4 Impedanční přizpůsobení

4.1 Impedance šroubovicové antény

Pokud je obvod antény menší než $2/3$ vlnové délky λ , impedance je velmi citlivá na frekvenci. Pokud je ale obvod velikostí srovnatelný s vlnovou délkou (osový způsob vyzařování), impedance je dána přibližně empirickým vztahem [5]

$$R = 140C / \lambda \text{ } [\Omega]. \quad (17)$$

Pro napájení koaxiálním kabelem je potřeba přizpůsobit anténu na charakteristickou impedanci vedení $Z_{ov}=50\Omega$.

4.2 Transformace impedance

Každou anténu je nutné impedančně přizpůsobit na hodnotu 50Ω na jejím kmitočtu. Při sledování hodnoty impedance nebudu pracovat přímo s modulem a fází impedance, ale budu pracovat s hodnotou činitele odrazu (parametr S_{11}).

Při impedančním přizpůsobení bude parametr S_{11} vykazovat minimum, které bude určeno na minimálně $S_{11}=-10\text{dB}$. Více viz [7] a [20].

4.3 Čtvrtvlnný transformátor

Jednou z možností realizace impedančního přizpůsobení je čtvrtvlnný transformátor.

Čtvrtvlnný úsek vedení transformuje impedanci zátěže na impedanci úměrnou její převrácené hodnotě. Stejně vlastnosti mají i úseky vedení délky

$$l_z = (2n - 1) \cdot \lambda / 4, \quad (18)$$

kde n je celé číslo [4].

Impedance se transformuje podle vzorce [18]

$$Z_t = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}. \quad (19)$$

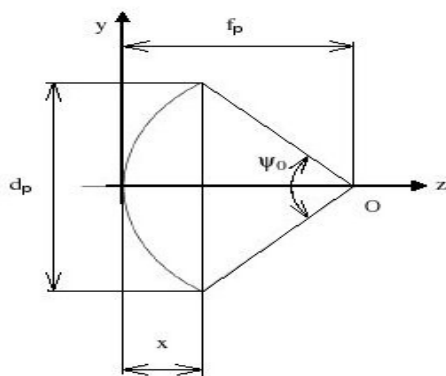
Pomocí hodnoty Z_t bude vybrán konkrétní materiál pro transformátor.

Čtvrtvlnný transformátor bude také navržen v programu firmy Zeland LineGauge, který je určen pro návrh mikropáskových struktur. Tento transformátor bude namodelován v programu CST Microwave studio a odsimulován na optimalizovaných anténách. Transformátor bude mít vliv na zisk, který by měl přijatelně snížit. Poměr hlavního laloku charakteristiky proti vedlejším lalokům by měl zůstat zachován.

5 Parabolické antény

5.1 Obecné informace

Reflektorové antény, nejčastěji tvaru rotačního paraboloidu, soustřeďují záření primárního zářiče odrazem vln od reflektoru. Umístěním primárního zářiče do ohniska reflektoru O vznikne v rovině ústí reflektoru soufázové pole, které zaručuje úzký diagram záření. Vlastnosti parabolické antény nezávisí na tom, jaký primární zářič je použitý, závisí pouze na jeho směrové charakteristice a polarizaci. Pro dosažení nízké úrovně bočních laloků je třeba, aby amplitudy pole u okrajů ústí byly nižší než uprostřed (obvykle o 6 dB až 10dB), viz [2], [16] a [17].



Obr. 3: Rozměry parabolické antény

V klasickém provedení má reflektor tvar vrchlíku rotačního paraboloidu s kruhovou aperturou, v jehož ústí je rovinná vlna (má všude stejnou fázi). Pro šířku hlavního laloku pro pokles 3 dB platí

$$2 \Theta_{0,7} = 59 \frac{\lambda_0}{d_p} [^\circ], \quad (d_p > 10 \lambda_0). \quad (20)$$

Pro činitel směrovosti (zisk) platí

$$D_{max} = \nu \frac{(4\pi S_p)}{\lambda^2}, \quad (21)$$

kde S_p je plošný obsah apertury a ν je tzv. činitel využití ústí nebo také redukovaný zisk antény, který nabývá obvykle velikosti 0,5 – 0,6.

Při návrhu se obvykle vychází z požadovaného zisku a vypočítá se průměr reflektoru d_p . Ohnisková vzdálenost f_p se stanoví s ohledem na poměr f_p/d_p , který se volí blízký hodnotě 0,4. Při nesprávné hodnotě by klesl činitel využití ν a primární zářič by neosazoval dostatečně okraje paraboly (primární zářič by byl moc blízko), nebo by ozařoval nejen reflektor, ale i část okolí (primární zářič by byl příliš daleko).

Tvar rotačního paraboloidu je popsán rovnicí

$$y^2 = 4 \cdot f_p \cdot z. \quad (22)$$

Směr osy z je směr maximálního záření antény.

Pro hloubku rotační paraboly platí

$$x = \frac{d_p^2}{(16 f_p)} \quad (23)$$

Pro ohniskový úhel (úhlovou aperturu) ψ_0 platí

$$\frac{\psi_0}{2} = \arctg\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{d_p}{f_p - x}\right) = \arctg\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{d_p}{f_p - \frac{d_p^2}{16 f_p}}\right) = \arctg\left(\frac{8 f_p d_p}{16 f_p^2 - d_p^2}\right) \quad (24)$$

Při návrhu soustavy primární zářič a reflektorová anténa pro příjem a vysílání kruhové polarizace je nutné navrhnout primární zářič s ohledem na fakt, že při odrazu vlny od reflektorové antény dojde ke změně smyslu rotace vlny.

5.2 Šroubovicová anténa jako ozařovač paraboly

Šroubovicová anténa je pro použití jako ozařovač paraboly vhodná díky osovému způsobu vyzařování, kdy vykazuje jeden hlavní lalok zářící ve směru osy šroubovice. Ten je téměř shodný v rovinách vyzařování E a H.

Ozařovač paraboly musí být rozměrově malý. Příliš dlouhá anténa by stínila samotnou parabolu a snižovala zisk soustavy. Z tohoto důvodu bude mít anténa navržená jako ozařovač paraboly počet závitů $N=5$.

Anténní soustava anténa a parabola bude přijímat levotočivě polarizovaný signál. Protože při odrazu vlny od reflektoru se změni smysl polarizace, bude samotná anténa navržena na příjem vlny pravotočivě polarizované.

6 Teoretický návrh

6.1 Návrh antény pro $f=1,6\text{GHz}$

Vlnová délka je dána vztahem [5]

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^9} = 0,1875 \text{ m} = 187,5 \text{ mm} \quad . \quad (25)$$

Obvod šroubovice pro osový způsob vyzářování, kde platí $C \approx \lambda$

$$C = 0,1875 \text{ m} = 187,5 \text{ mm} \quad .$$

Průměr šroubovice (mezi středy vodičů) podle (1)

$$D = \frac{C}{\pi} = \frac{0,1875}{3,14} = 0,0597 \text{ m} = 59,7 \text{ mm} \quad .$$

Impedance vypočtená podle (13)

$$R = 140 \cdot \frac{C}{\pi} = 140 \cdot \frac{0,1875}{0,1875} = 140 \, \Omega \quad .$$

Pro optimální návrh stanovil J. D. Kraus požadavek, aby úhel stoupání α byl v mezích od 12° do 15° . Pro návrh si zvolím $\alpha=13^\circ$.

Vzdálenost mezi závitů (mezi středy vodičů) vypočtená podle (2)

$$S = \tan \alpha \cdot C = \tan 13^\circ \cdot 0,1875 = 0,23 \cdot 0,1875 = 0,0433 \text{ m} = 43,3 \text{ mm} \quad .$$

Délka jednoho závitu se dá určit jako $l=\lambda$, přesněji je vypočtená podle (4)

$$l = \sqrt{C^2 + S^2} = \sqrt{0,1875^2 + 0,0433^2} = 0,1924 \text{ m} = 192,4 \text{ mm} \quad .$$

Průměr zemní desky (reflektoru) je nejméně $0,8 \lambda = 0,8 \cdot 18,75 = 150,8 \text{ mm} \quad .$

Počet závitů zvolím napřed s ohledem na podmínku pro kruhovou polarizaci, kdy počet závitů N má být větší než 10 závitů. Proto zvolím počet závitů $N=15$.

Potom délka antény vypočtená podle (3)

$$L = N \cdot S = 15 \cdot 0,0433 = 0,6495 \text{ m} = 649,5 \text{ mm} \quad .$$

Počet závitů zvolím nyní s ohledem na vlastnosti ozařovače paraboly $N=5$. Změna počtu závitů antény má v návrhu vliv pouze na celkovou délku antény. Ta vypočtená ze vztahu (3)

$$L = N \cdot S = 5 \cdot 0,0433 = 0,2165 \text{ m} = 216,5 \text{ mm} \quad .$$

6.2 Ověření parametrů pro $f=1,6\text{GHz}$, $N=10$

Pomocí dvou programů [9] a [12] volně dostupných na internetu jsem ověřila správnost teoretického návrhu. Výsledný návrh pomocí těchto programů je na obrázcích 4 a 5.

Unit	Number
Required Data Entry	
Frequency	1600 MHz
Number of Turns	15 Turns (4-36)
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Clear Values"/>	
Calculated Results	
Gain	15.23 dB
Wavelength Reflector	7.377 Inches 18.737 cm
Circumference	8.085 Inches 20.536 cm
Diameter	2.573 Inches 6.537 cm
Spacing Between Turns	1.837 Inches 4.666 cm
Length of Each Turn	8.291 Inches 21.059 cm
Length of Wire Needed	124.364 Inches 315.884 cm
Antenna Length	27.553 Inches 69.984 cm

Version 1.4.2

Obr. 4: *Ověření parametrů antény pro $f=1,6\text{GHz}$ podle [9]*

	Scalar	Absolute	Units	Notes
Units	Metric (cm) ▾			
Chirality	right ▾	<input type="button" value="Set Defaults For This Frequency"/>		
Frequency	1600 MHz	$\lambda =$ 18.75	cm	
Diameter	0.3310425612508316 * λ	6.207048023453092	cm	Diameter of antenna (eg. outer diameter of tubing), between 0.238732616286657 and 0.423352506215006 λ
# turns	15			Number of full helix windings
Sλ	0.24965 *C λ	4.868175000000001	cm	Axial Linear Distance of winding. Between 0.2126 C λ and 0.2867 C λ
Ground Diameter	1 * λ	18.75	cm	Ground Plane Diameter Between 0.8 λ and 1.1 λ
Resolution	72 dpi			Dots per inch for printing
Antenna Length	73.022625	cm		
Read only values.				
Cλ	1.04 * λ	19.5	cm	Circumference of Winding. Valid between 0.75 λ and 1.33 λ
Gain	17.874895080443704 dBi			
<input type="button" value="Get Helix Diagram"/> <input type="button" value="Get Ground Plane"/>				

Obr. 5: *Ověření parametrů antény pro $f=1,6\text{GHz}$ podle [12]*

6.3 Návrh antény pro $f=2,45\text{GHz}$

Vlnová délka je dána vztahem (25)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,45 \cdot 10^9} = 0,1224 \text{ m} = 122,4 \text{ mm} .$$

Obvod šroubovice pro osový způsob vyzařování, kdy $C \approx \lambda$

$$C = 0,1224 \text{ m} = 122,4 \text{ mm} .$$

Průměr šroubovice (mezi středy vodičů) vypočtený podle (1)

$$D = \frac{C}{\pi} = \frac{0,1224}{3,14} = 0,03898 \text{ m} = 38,98 \text{ mm} .$$

Impedance antény vypočtená podle (13)

$$R = 140 \cdot \frac{C}{\pi} = 140 \cdot \frac{0,1224}{0,1224} = 140 \Omega .$$

Aby úhel stoupání α byl v mezích od 12° do 15° , zvolím $\alpha=13^\circ$.

Vzdálenost mezi závitů (mezi středy vodičů) vypočtená podle (2)

$$S = \tan \alpha \cdot C = \tan 13^\circ \cdot 0,1224 = 0,23 \cdot 0,1224 = 0,0282 \text{ m} = 28,2 \text{ mm} .$$

Délka jednoho závitu se dá určit jako $l=\lambda$, přesněji je vypočtená podle (4)

$$l = \sqrt{C^2 + S^2} = \sqrt{0,1224^2 + 0,0282^2} = 0,1256 \text{ m} = 125,6 \text{ mm} .$$

Průměr zemní desky (reflektoru) je nejméně $0,8 \lambda = 0,8 \cdot 12,24 = 97,92 \text{ mm} .$

Počet závitů zvolím napřed s ohledem na podmínku pro kruhovou polarizaci, kdy počet závitů N má být větší než 10 závitů. Proto zvolím počet závitů $N=12$.

Potom délka antény vypočtená podle (3)

$$L = N \cdot S = 12 \cdot 0,0282 = 0,3384 \text{ m} = 338,4 \text{ mm} .$$

Počet závitů zvolím nyní s ohledem na vlastnosti ozařovače paraboly $N=5$. Změna počtu závitů antény má v návrhu vliv pouze na celkovou délku antény. Ta vypočtená ze vztahu (3)

$$L = N \cdot S = 5 \cdot 0,0282 = 0,141 \text{ m} = 141 \text{ mm} .$$

6.4 Ověření parametrů pro $f=2,45\text{GHz}$, $N=10$

Pomocí dvou programů [9] a [12] volně dostupných na internetu jsem ověřila správnost teoretického návrhu. Výsledný návrh pomocí těchto programů je na obrázcích 6 a 7.

Unit	Number
Required Data Entry	
Frequency	2450 MHz
Number of Turns	12 Turns (4-36)
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Clear Values"/>	
Calculated Results	
Gain	14.39 dB
Wavelength Reflector	4.817 Inches 12.236 cm
Circumference	5.237 Inches 13.301 cm
Diameter	1.667 Inches 4.234 cm
Spacing Between Turns	1.190 Inches 3.022 cm
Length of Each Turn	5.370 Inches 13.640 cm
Length of Wire Needed	64.440 Inches 163.678 cm
Antenna Length	14.277 Inches 36.263 cm

Version 1.4.2

Obr. 6: Ověření parametrů antény pro $f=1,6\text{GHz}$ podle [9]

	Scalar	Absolute	Units	Notes
Units	Metric (cm) ▾			
Chirality	right ▾	<input type="button" value="Set Defaults For This Frequency"/>		
Frequency	2450 MHz	$\lambda =$ 12.244897959183673	cm	
Diameter	0.3310425612508316 * λ	4.053582382663244	cm	Diameter of antenna (eg. outer diameter of tubing), between 0.238732616286657 and 0.423352506215006 λ
# turns	12			Number of full helix windings
Sλ	0.24965 * $C\lambda$	3.1792163265306126	cm	Axial Linear Distance of winding. Between 0.2126 $C\lambda$ and 0.2867 $C\lambda$
Ground Diameter	1 * λ	12.244897959183673	cm	Ground Plane Diameter Between 0.8 λ and 1.1 λ
Resolution	72 dpi			Dots per inch for printing
Antenna Length	38.15059591836735	cm		
Read only values.				
$C\lambda$	1.04 * λ	12.73469387755102	cm	Circumference of Winding. Valid between 0.75 λ and 1.33 λ
Gain	16.90579495036314 dBi			
<input type="button" value="Get Helix Diagram"/> <input type="button" value="Get Ground Plane"/>				

Obr. 7: Ověření parametrů antény pro $f=2,45\text{GHz}$ podle [12]

6.5 Návrh antény pro $f=5,656\text{GHz}$

Vlnová délka je dána vztahem (25)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{5,656 \cdot 10^9} = 0,053 \text{ m} = 53 \text{ mm} \quad .$$

Obvod šroubovice pro osový způsob vyzařování, kdy $C \approx \lambda$

$$C = 0,053 \text{ m} = 53 \text{ mm} \quad .$$

Průměr šroubovice (mezi středy vodičů) vypočtený podle (1)

$$D = \frac{C}{\pi} = \frac{0,053}{3,14} = 0,0169 \text{ m} = 16,9 \text{ mm} \quad .$$

Impedance antény vypočtená podle (13)

$$R = 140 \cdot \frac{C}{\pi} = 140 \cdot \frac{0,053}{0,053} = 140 \, \Omega \quad .$$

Aby úhel stoupání α byl v mezích od 12° do 15° , zvolím $\alpha=13^\circ$.

Vzdálenost mezi závitů (mezi středy vodičů) vypočtená podle (2)

$$S = \tan \alpha \cdot C = \tan 13^\circ \cdot 0,053 = 0,23 \cdot 0,053 = 0,0122 \text{ m} = 12,2 \text{ mm} \quad .$$

Délka jednoho závitu se dá určit jako $l=\lambda$, přesněji je vypočtená podle (4)

$$l = \sqrt{C^2 + S^2} = \sqrt{0,053^2 + 0,0122^2} = 0,0544 \text{ m} = 54,4 \text{ mm} \quad .$$

Průměr zemní desky (reflektoru) je nejméně $0,8 \lambda = 0,8 \cdot 12,24 = 97,92 \text{ mm} \quad .$

Počet závitů zvolím s ohledem na podmínku pro kruhovou polarizaci, kdy počet závitů N má být větší než 10 závitů. Proto zvolím počet závitů $N=10$.

Potom délka antény vypočtená podle (3)

$$L = N \cdot S = 10 \cdot 0,0122 = 0,122 \text{ m} = 122 \text{ mm} \quad .$$

Počet závitů zvolím nyní s ohledem na vlastnosti ozařovače paraboly $N=5$. Změna počtu závitů antény má v návrhu vliv pouze na celkovou délku antény. Ta vypočtená ze vztahu (3)

$$L = N \cdot S = 5 \cdot 0,0122 = 0,061 \text{ m} = 61 \text{ mm} \quad .$$

6.6 Ověření parametrů pro $f=5,656\text{GHz}$, $N=10$

Pomocí dvou programů [9] a [12] volně dostupných na internetu ověřím správnost teoretického návrhu. Výsledný návrh pomocí těchto programů je na obrázcích 8 a 9.

Unit	Number
Required Data Entry	
Frequency	5656 MHz
Number of Turns	10 Turns (4-36)
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Clear Values"/>	
Calculated Results	
Gain	13.69 dB
Wavelength Reflector	2.087 Inches 5.300 cm
Circumference	2.256 Inches 5.730 cm
Diameter	0.718 Inches 1.824 cm
Spacing Between Turns	0.513 Inches 1.302 cm
Length of Each Turn	2.313 Inches 5.876 cm
Length of Wire Needed	23.133 Inches 58.757 cm
Antenna Length	5.125 Inches 13.018 cm

Version 1.4.2

Obr. 8: *Ověření parametrů antény pro $f=5,656\text{GHz}$ podle [9]*

	Scalar	Absolute	Units	Notes
Units	Metric (cm) <input type="button" value="v"/>			
Chirality	right <input type="button" value="v"/>	<input type="button" value="Set Defaults For This Frequency"/>		
Frequency	5656 MHz	$\lambda =$ 5.3041018387553045	cm	
Diameter	0.3310425612508316 * λ	1.7558834578368014	cm	Diameter of antenna (eg. outer diameter of tubing), between 0.238732616286657 and 0.423352506215006 λ
# turns	10			Number of full helix windings
Sλ	0.24965 *C λ	1.3771357850070725	cm	Axial Linear Distance of winding. Between 0.2126 C λ and 0.2867 C λ
Ground Diameter	1 * λ	5.3041018387553045	cm	Ground Plane Diameter Between 0.8 λ and 1.1 λ
Resolution	72 dpi			Dots per inch for printing
Antenna Length	13.771357850070725	cm		
Read only values.				
Cλ	1.04 * λ	5.516265912305517	cm	Circumference of Winding. Valid between 0.75 λ and 1.33 λ
Gain	16.113982489886894 dBi			
<input type="button" value="Get Helix Diagram"/> <input type="button" value="Get Ground Plane"/>				

Obr. 9: *Ověření parametrů antény pro $f=5,656\text{GHz}$ podle [12]*

7 Návrh impedančního přizpůsobení

7.1 Návrh čtvrtvlnného transformátoru

Impedanční přizpůsobení bude navrženo pro transformaci impedance $Z_k=140\Omega$ na impedanci vedení $Z_0=50\Omega$. Pro transformaci impedance je zvolen čtvrtvlnný transformátor konstruovaný jako závit antény.

Impedance transformátoru bude pro všechny antény stejná, vypočtená podle vzorce (19)

$$Z_t = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} = \sqrt{140 \cdot 50} = 84 \Omega$$

Transformátor impedance bude modelován a poté realizován jako jeden závit antény, jeho délka bude tedy vyšší než je délka jednoho závitu antény. Toho docílím zvolením vhodného počtu násobků délky čtvrtvlny $n=3$. Ten je pro všechny antény stejný protože všechny mají obvod roven vlnové délce a úhel stoupání závitů $\alpha=13^\circ$.

Pro frekvenci $f=1,6\text{GHz}$ je délka jednoho závitu antény $l=192,4\text{mm}$. Délka transformátoru vypočtená podle vzorce (18).

$$l_z = (2n-1)\lambda/4 = 5 \cdot 0,1875/4 = 0,2345\text{ m} = 234,5\text{ mm}$$

Pro frekvenci $f=2,45\text{GHz}$ je délka jednoho závitu antény $l=125,6\text{mm}$. Délka transformátoru vypočtená podle vzorce (18)

$$l_z = (2n-1)\lambda/4 = 5 \cdot 0,1224/4 = 0,153\text{ m} = 153\text{ mm}$$

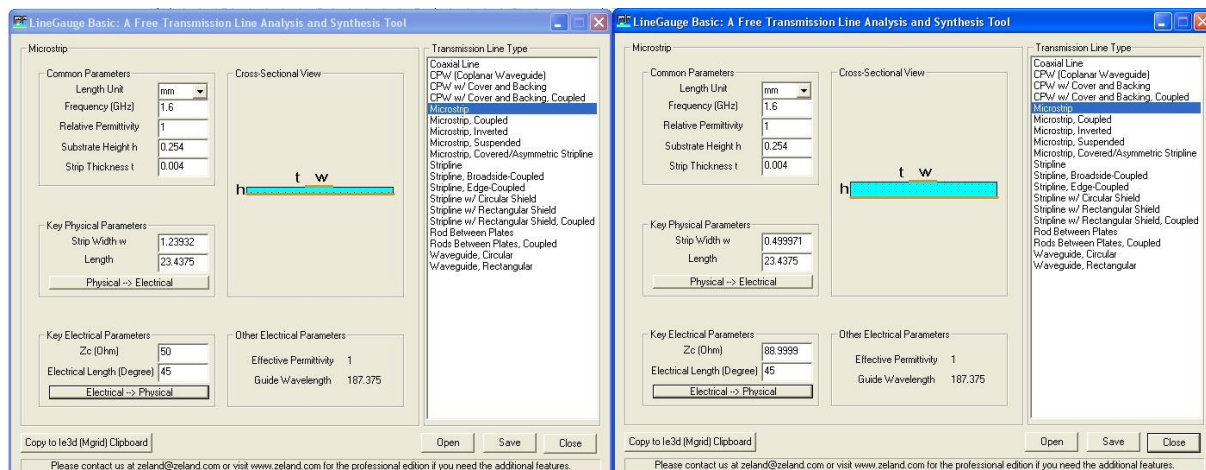
Pro frekvenci $f=5,656\text{GHz}$ je délka jednoho závitu antény $l=54,4\text{mm}$. Délka transformátoru vypočtená podle vzorce (18)

$$l_z = (2n-1)\lambda/4 = 5 \cdot 0,053/4 = 0,067\text{ m} = 67\text{ mm}$$

7.2 Návrh transformátorů impedance

Konkrétní hodnoty rozměrů přizpůsobení tvaru rozšiřujícího se obdélníku navrhnu v programu firmy Zeland LineGauge určeného pro návrh mikropáskových struktur. Relativní permitivitu podkladu zvolím $\epsilon_r=1$, což je přibližně hodnota volného prostoru. Teoretická hodnota impedance antén je $R=140\Omega$. Impedance změřená ze simulací v programu CST Microwave studio je ale různá. Transformátor impedance proto navrhnu pro každou anténu zvlášť.

Impedance antény pro $f=1,6\text{GHz}$ má hodnotu $Z=89\angle-45^\circ$. Abych vykompenzovala imaginární složku impedance, upravím délku transformátoru pro úhel 45° . Transformátor bude mít rozměry u antény $t_1=0,004\text{mm}$, $w_1=0,5\text{mm}$, rozměry u napájecího vodiče $t_2=0,004\text{mm}$, $w_2=1,24\text{mm}$, délka transformátoru $l_z=23,44\text{mm}$. Délka závitu realizujícího transformátor impedance bude $l_z=236,8\text{mm}$.



Obr. 10: Návrh impedančního přizpůsobení pro $f=1,6\text{GHz}$

Impedance antény pro $f=2,45\text{GHz}$ má hodnotu $Z=95\angle-30^\circ$. Abych vykompenzovala imaginární složku impedance, upravím délku transformátoru pro úhel 30° . Transformátor bude mít rozměry u antény $t_1=0,5\text{mm}$, $w_1=0,5\text{mm}$, rozměry u napájecího vodiče $t_2=0,5\text{mm}$, $w_2=2,06\text{mm}$, délka transformátoru $l_z=10,2\text{mm}$. Délka závitů realizujícího transformátor impedance bude $l_z=154\text{mm}$.

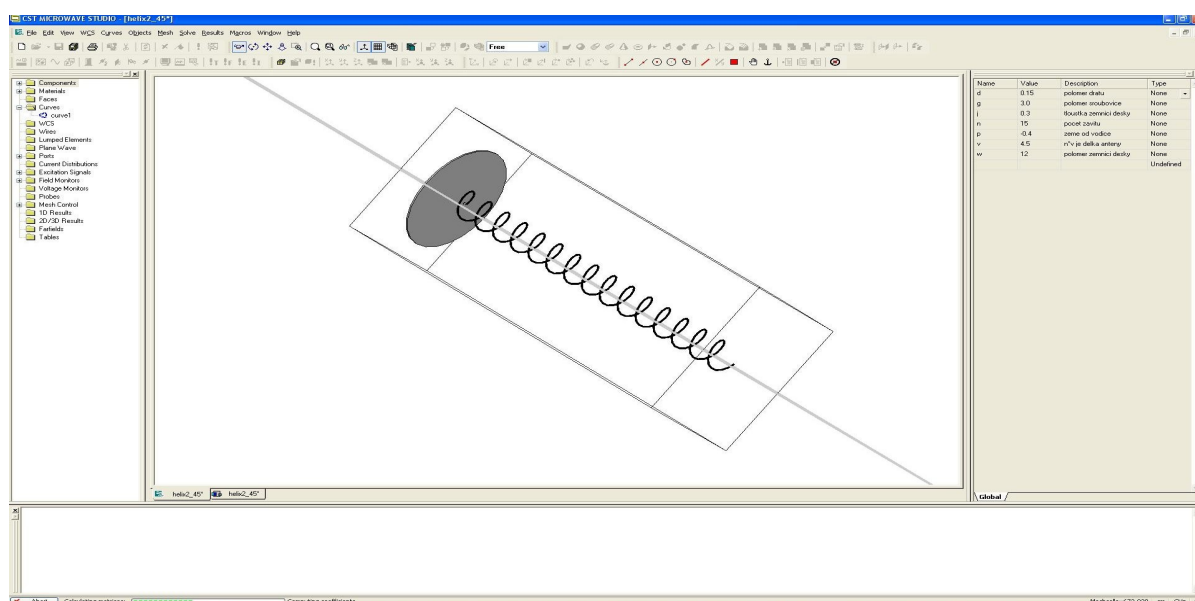
Impedance antény pro $f=5,656\text{GHz}$ má hodnotu $Z=48\angle-50^\circ$. Abych vykompenzovala imaginární složku impedance, upravím délku transformátoru pro úhel 50° . Transformátor bude mít rozměry u antény $t_1=0,004\text{mm}$, $w_1=1,31\text{mm}$, rozměry u napájecího vodiče $t_2=0,004\text{mm}$, $w_2=1,24\text{mm}$, délka transformátoru $l_z=7,37\text{mm}$. Délka závitů realizujícího transformátor impedance bude $l_z=74,3\text{mm}$.

8. Simulace v CST Microwave studio

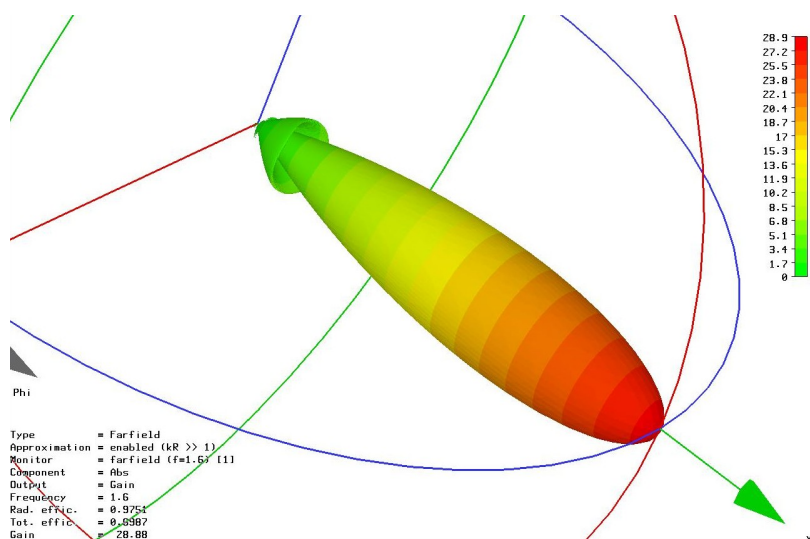
8.1 Simulace s anténou bez impedančního přizpůsobení pro $f=1,6\text{GHz}$

Simulaci a optimalizaci antény jsem realizovala ve školní laboratoři v programu CST Microwave studio verze 2006B.00.

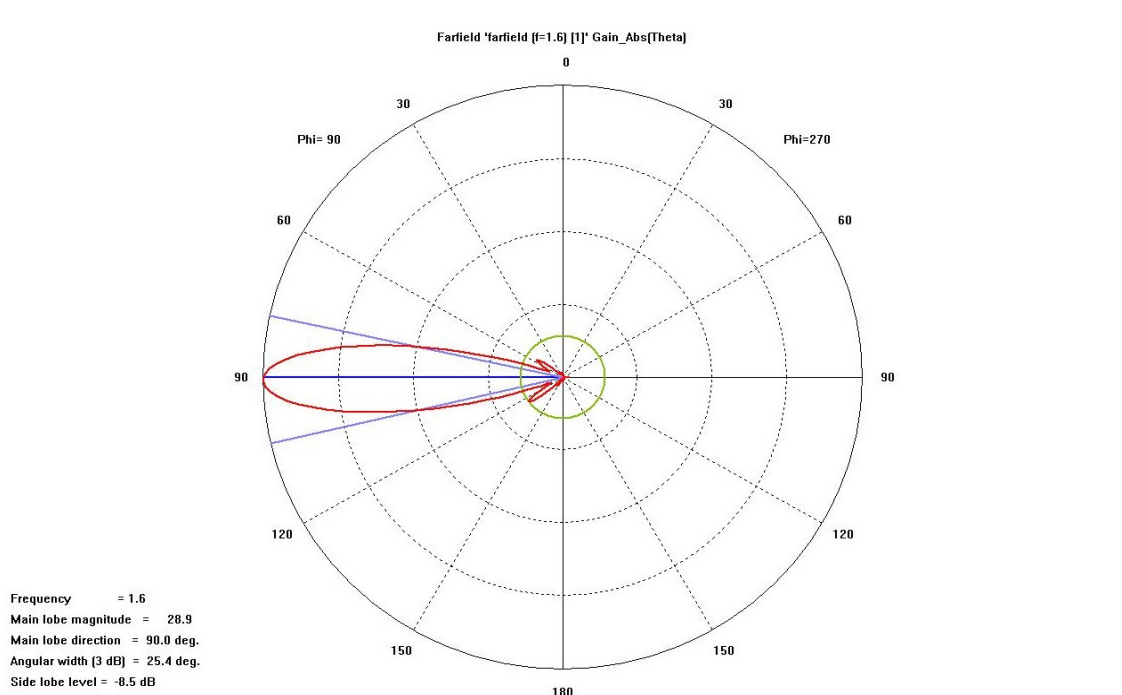
V první části optimalizuji anténu na maximální zisk vyzařování pomocí jednoho hlavního laloku s maximálním potlačením laloků vedlejších. Program CST Microwave studio umožňuje zobrazení vyzařovací charakteristiky ve třech zobrazeních. Charakteristiku vykresluje ve 3D zobrazení, polárních souřadnicích nebo v ortogonálních souřadnicích. Pro určení vlastností antény využiji zobrazení v polárních souřadnicích pro odečet zisku, úhlové šířky hlavního laloku a úrovně postranních laloků. Tyto hodnoty změřím a zobrazím přímo simulátor.



Obr. 11: Simulace a optimalizace v programu CST Microwave studio - ukázka modelu



Obr. 12: Simulace a optimalizace v programu CST Microwave studio - vyzařovací charakteristika v 3D zobrazení



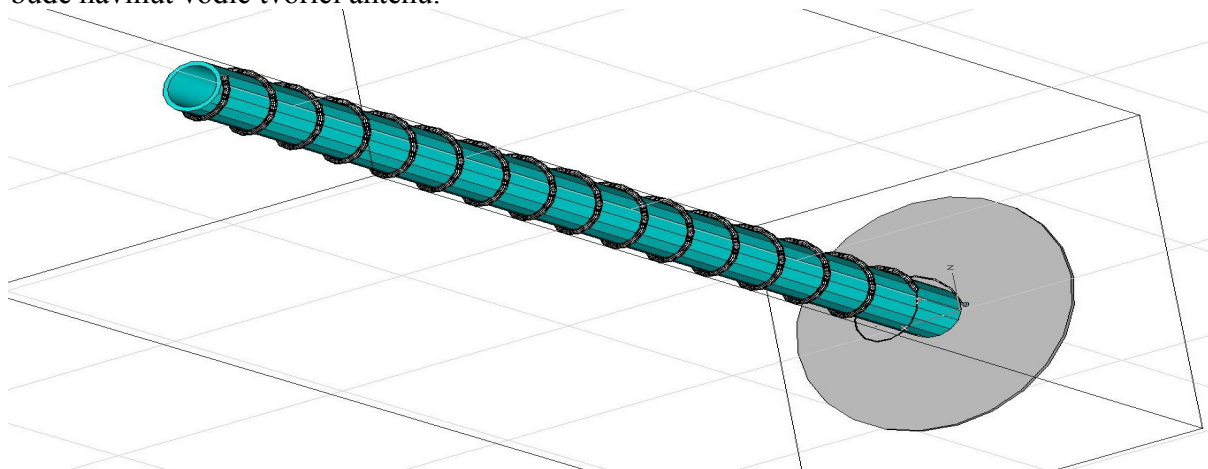
Obr. 13: Simulace a optimalizace v programu CST Microwave studio - vyzařovací charakteristika v polárních souřadnicích

Nejllepších výsledků při optimalizaci hlavního laloku a potlačení postranních laloků pro počet závitů $N=15$ jsem dosáhla s průměrem antény $D=60\text{mm}$, obvodem $C=188,5\text{mm}$, vzdáleností mezi závity $S=45\text{mm}$, délkou jednoho závitu $l=193,8\text{mm}$, průměrem zemní desky $D_z=240\text{mm}$, tloušťkou zemní desky $L_z=3\text{mm}$ a průměrem vodiče $d=3\text{mm}$.

Optimalizovaná anténa má zisk $G=28,88\text{ dB}$. Úhlovou šířku hlavního laloku pro pokles 3dB jsem odečetla $\theta_{0,7}=25,4^\circ$ a pro úroveň postranních laloků jsem odečetla hodnotu $-8,5\text{ dB}$.

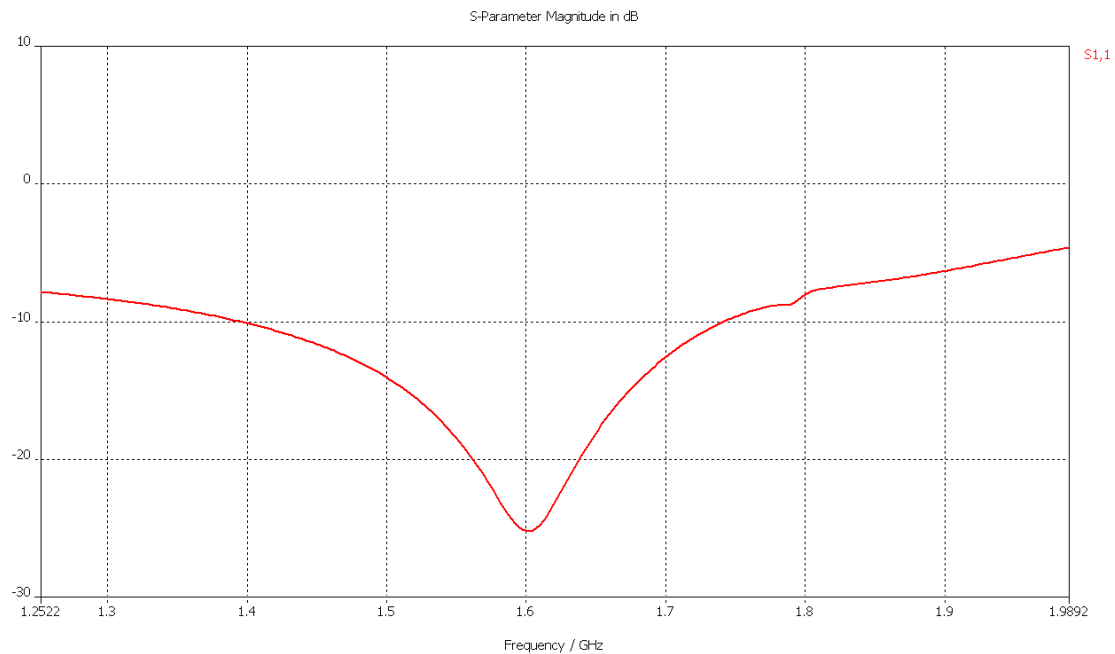
8.2 Simulace antény s impedančním přizpůsobením pro $f=1,6\text{GHz}$

Model jsem upravila tak, aby odpovídal připravované realizaci antény. Byl doplněn o impedanční přizpůsobení realizované jako závit antény a o polyethylenovou trubku, na kterou bude navinut vodič tvořící anténu.



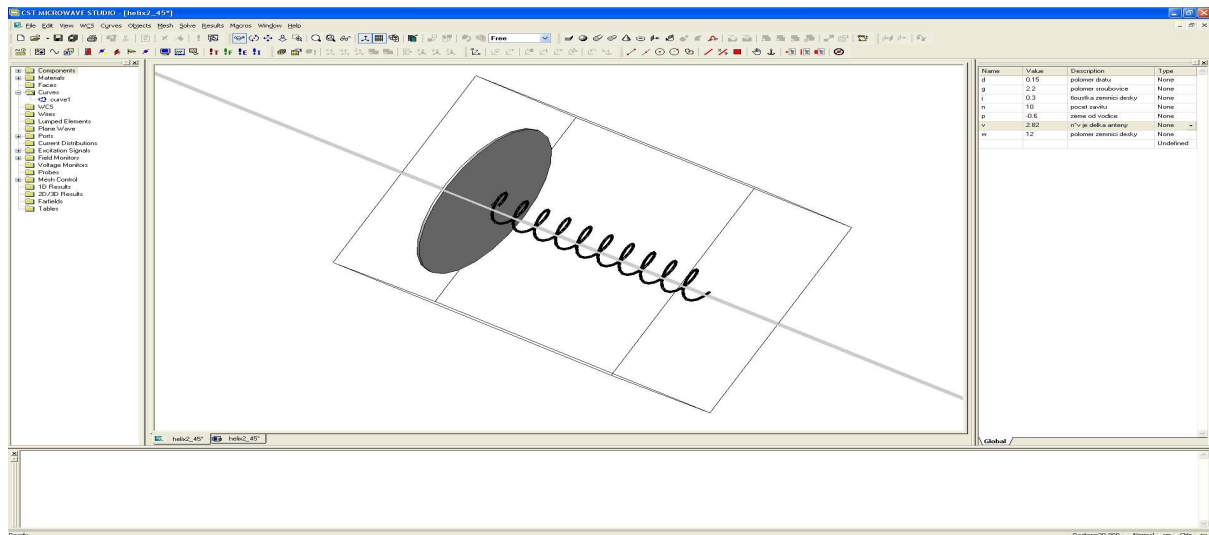
Obr. 14: Model reálné antény pro $f=1,6\text{GHz}$

Model reálné antény jsem optimalizovala na maximální zisk a minimální hodnotu parametru S_{11} . Výsledkem je anténa s rozměry uvedenými v tabulce 1. Šířka pásma odečtená z grafu $B=190\text{MHz}$, na kmitočtu $f=1,6\text{GHz}$ jsem odečetla parametr $S_{11}=-25\text{dB}$, zisk antény se zvýšil na $G=29,6\text{dB}$, šířka hlavního laloku $\theta_{0,7}=28,2^\circ$ a úroveň postranních laloků jsem odečetla $-8,4\text{dB}$.

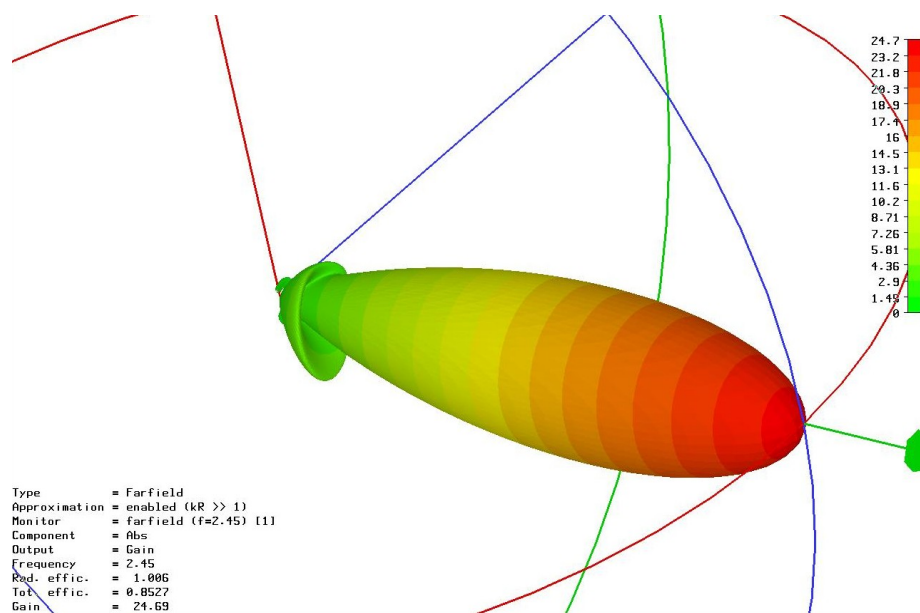


Obr. 15: Grafická závislost parametru s_{11} na kmitočtu pro $f=1,6\text{GHz}$

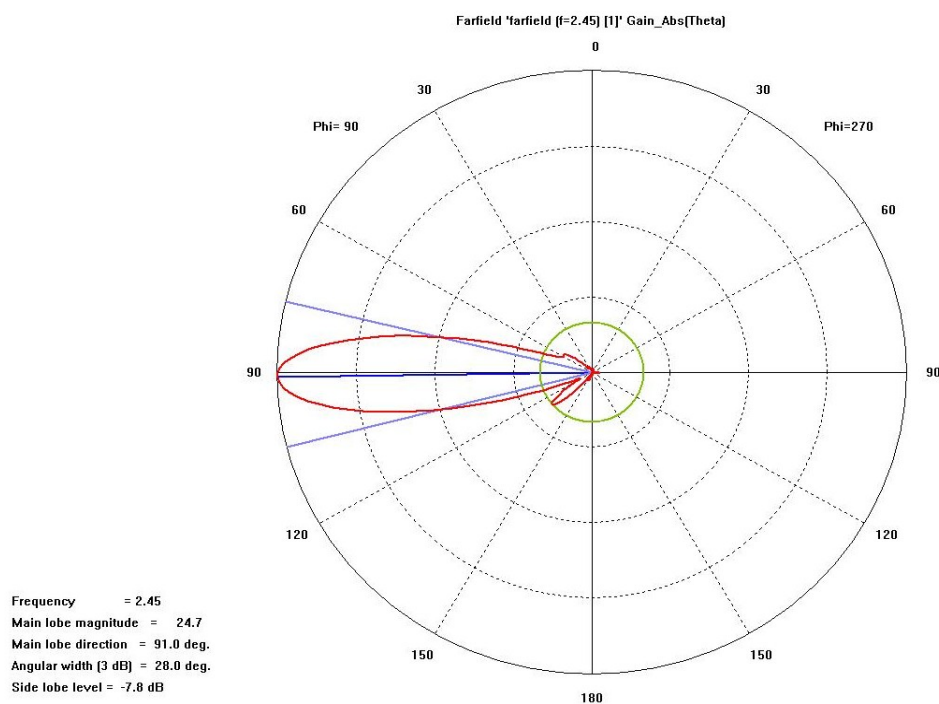
8.3 Simulace pro $f=2,45\text{GHz}$



Obr. 16: Simulace a optimalizace v programu CST Microwave studio - ukázka modelu



Obr. 17: Simulace a optimalizace v programu CST Microwave studio - vyzařovací charakteristika v 3D zobrazení



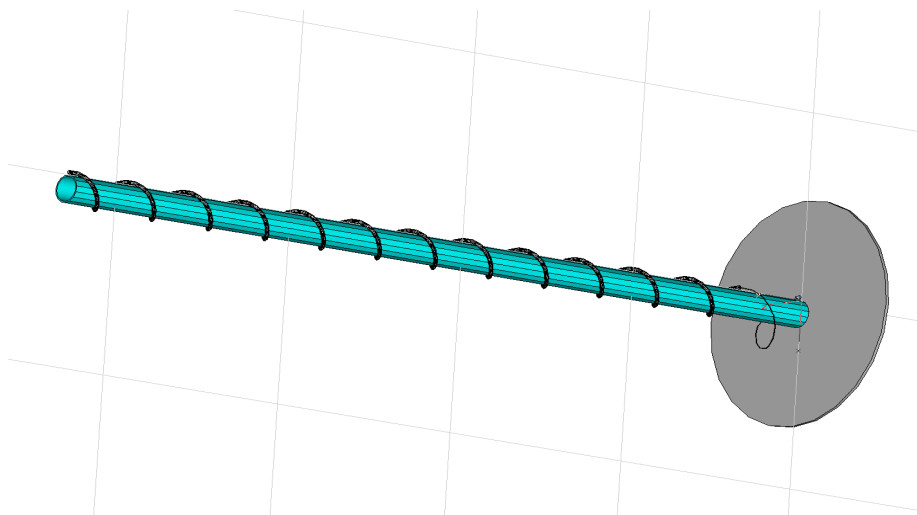
Obr. 18: Simulace a optimalizace v programu CST Microwave studio - vyzařovací charakteristika v polárních souřadnicích

Nejlepších výsledků pro počet závitů $N=12$ jsem dosáhla s průměrem antény $D=44\text{mm}$, obvodem $C=138,2\text{mm}$, vzdáleností mezi závitů $S=28,2\text{mm}$, délkou jednoho závitu $l=143,8\text{mm}$, průměrem zemní desky $D_z=140\text{mm}$, tloušťkou zemní desky $L_z=3\text{mm}$ a průměrem vodiče $d=3\text{mm}$.

Optimalizovaná anténa má zisk $G=24,69\text{dB}$. Úhlovou šířku hlavního laloku pro pokles 3dB jsem odečetla $\theta_{0,7}=28^\circ$ a pro úroveň postranních laloků jsem odečetla hodnotu $-7,8\text{ dB}$.

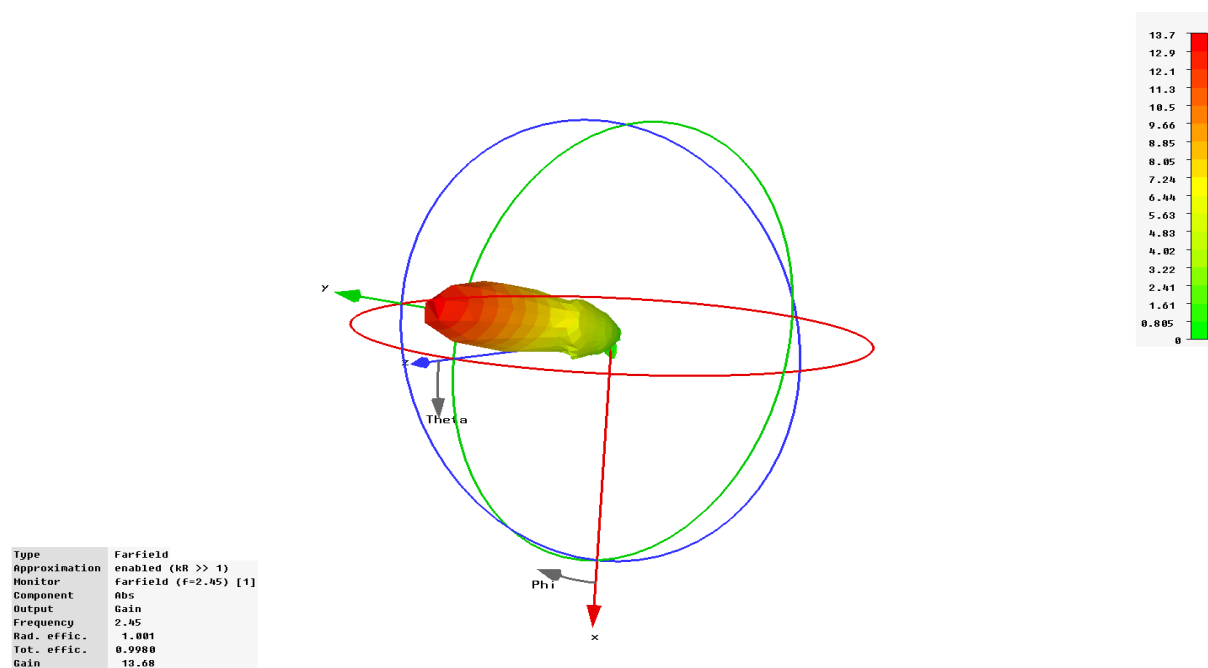
8.4 Simulace antény s impedančním přizpůsobením pro $f=2,45\text{GHz}$

Model jsem upravila tak, aby odpovídal připravované realizaci antény. Byl doplněn o impedanční přizpůsobení realizované jako závit antény a o polyethylenovou trubku, na kterou bude navinut vodič tvořící anténu.

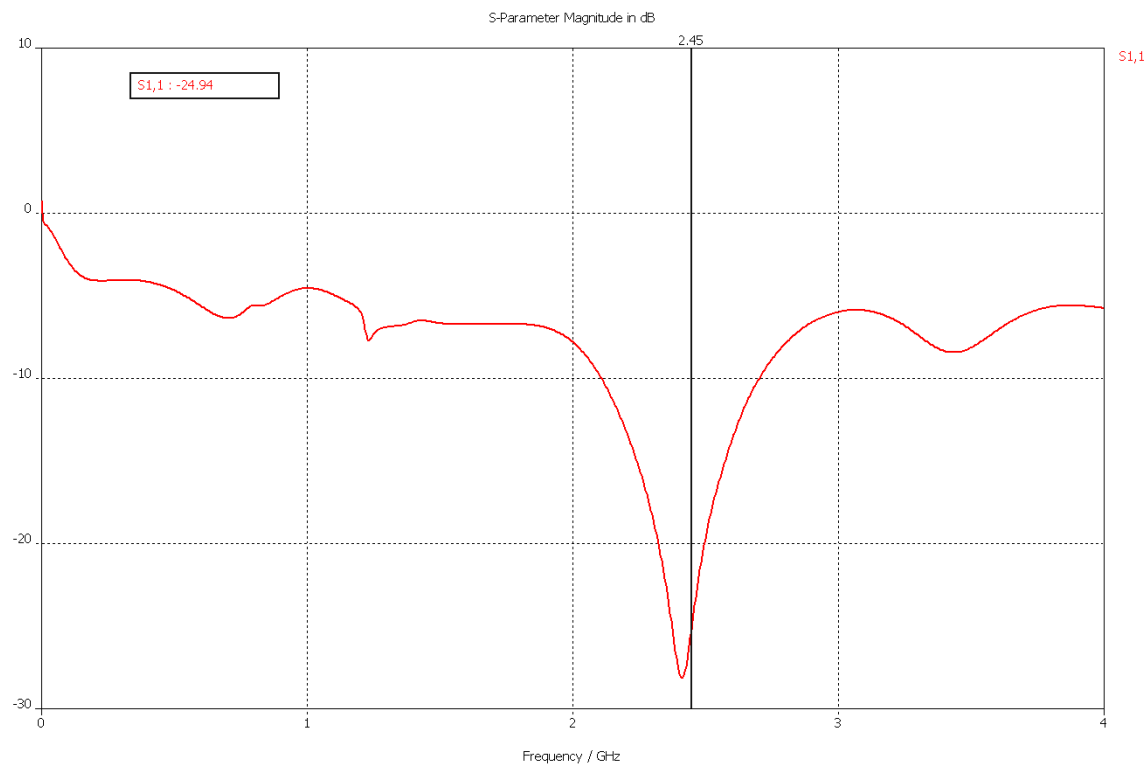


Obr. 19: Model reálné antény pro $f=2,45\text{GHz}$

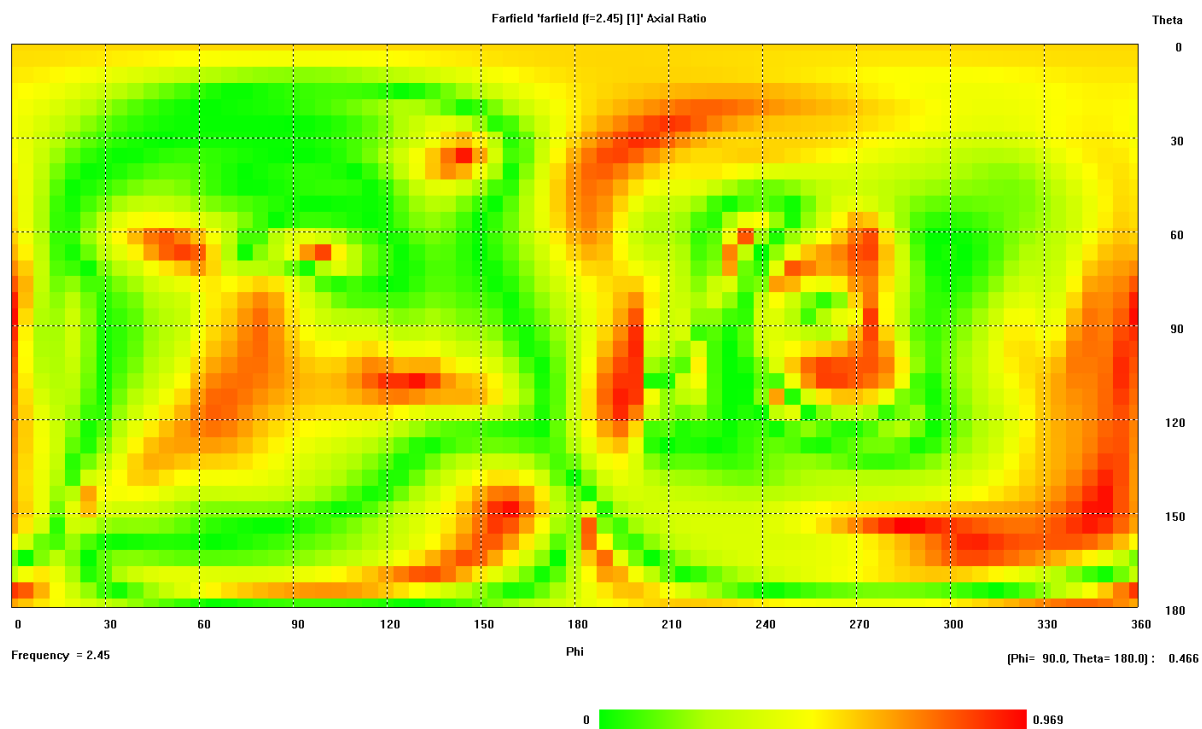
Model reálné antény jsem optimalizovala na maximální zisk a minimální hodnotu parametru S_{11} . Výsledkem je anténa s rozměry uvedenými v tabulce 1. Šířka pásma odečtená z grafu $B=450\text{MHz}$, na kmitočtu $f=2,45\text{GHz}$ jsem odečetla parametr $S_{11}=-24,94\text{dB}$, zisk antény klesl na $G=13,68\text{dB}$, šířka hlavního laloku $\theta_{0,7}=36^\circ$ a úroveň postranních laloků jsem odečetla $-9,7\text{dB}$.



Obr. 20: Vyzařovací charakteristika pro $f=2,45\text{GHz}$

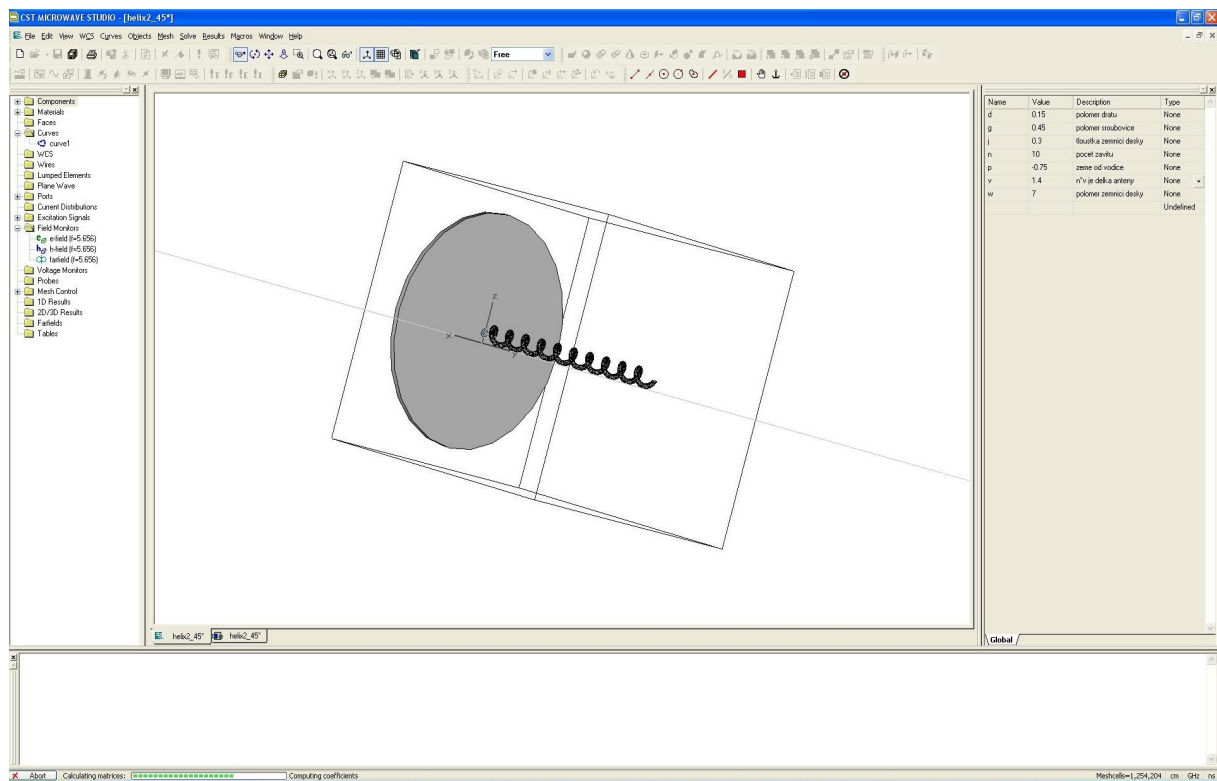


Obr. 21: Grafická závislost parametru s_{11} na kmitočtu pro $f=2,45\text{GHz}$

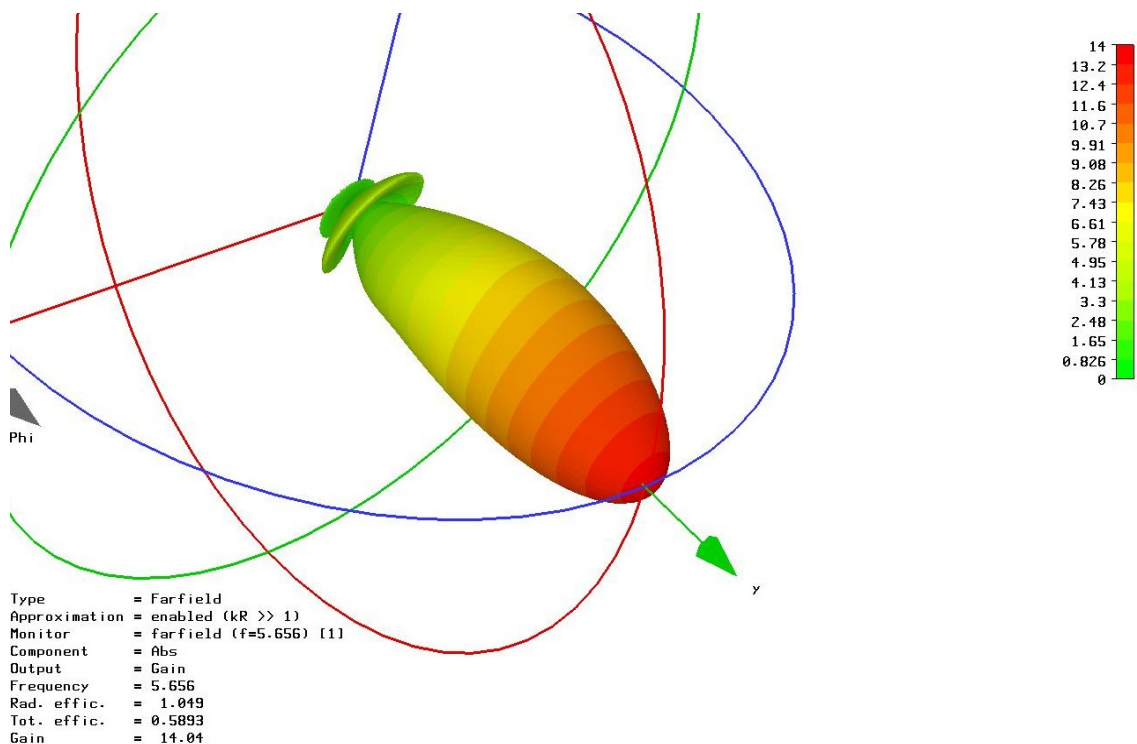


Obr. 22: Poměr horizontálního a vertikálního vyzařování pro $f=2,45\text{GHz}$

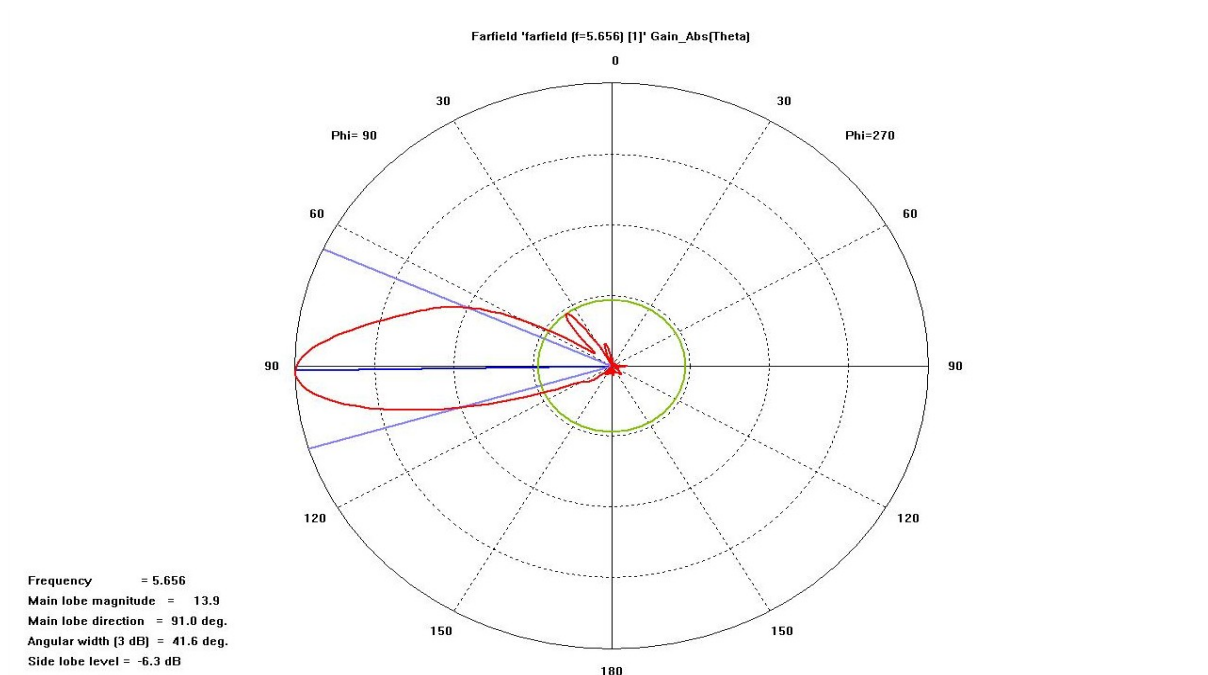
8.5 Simulace pro $f=5,656\text{GHz}$



Obr. 23: Simulace a optimalizace v programu CST Microwave studio - ukázka modelu



Obr. 24: Simulace a optimalizace v programu CST Microwave studio - vyzářovací charakteristika v 3D zobrazení



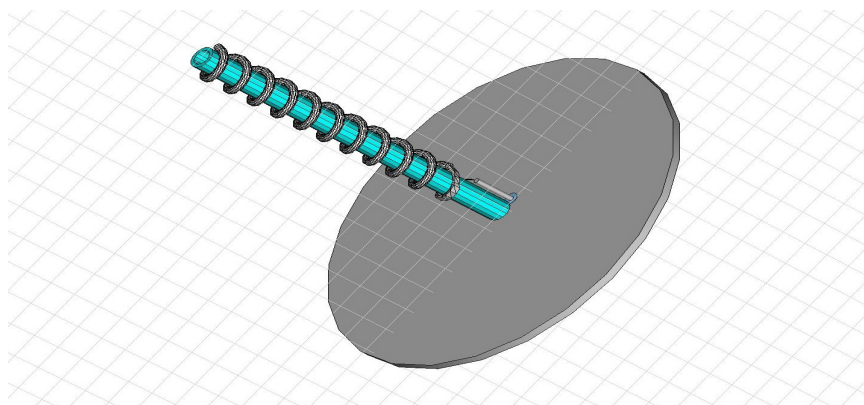
Obr. 25: Simulace a optimalizace v programu CST Microwave studio - vyzařovací charakteristika v polárních souřadnicích

Nejllepších výsledků pro počet závitů $N=10$ jsem dosáhla s průměrem antény $D=9\text{mm}$, obvodem $C=28,3\text{mm}$, vzdáleností mezi závity $S=14\text{mm}$, délkou jednoho závitu $l=31,6\text{mm}$, průměrem zemní desky $D_z=140\text{mm}$, tloušťkou zemní desky $L_z=3\text{mm}$ a průměrem vodiče $d=3\text{mm}$.

Optimalizovaná anténa má zisk $G=14,04\text{ dB}$. Úhlovou šířku hlavního laloku pro pokles 3dB jsem odečetla $\theta_{0,7}=41,6^\circ$ a pro úroveň postranních laloků jsem odečetla hodnotu -6,3 dB.

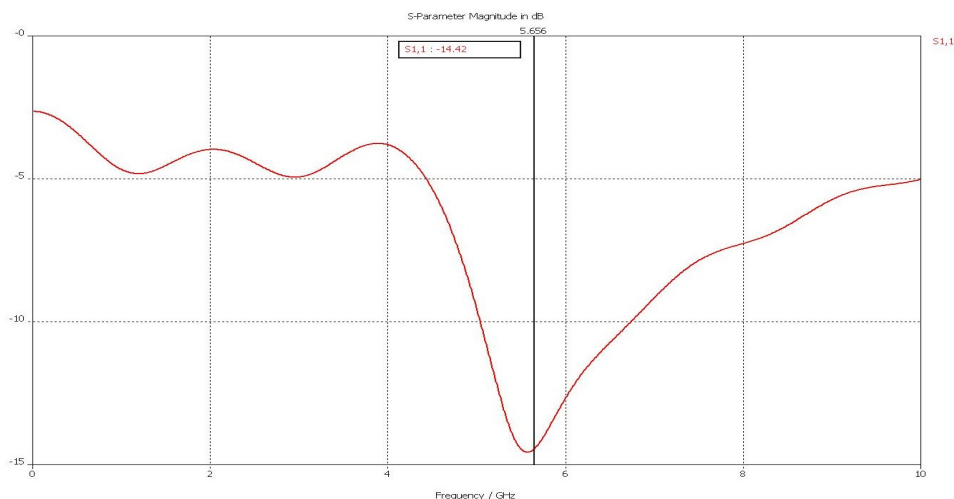
8.6 Simulace antény s impedančním přizpůsobením pro $f=5,656\text{GHz}$

Model jsem upravila tak, aby odpovídal připravované realizaci antény. Byl doplněn o impedanční přizpůsobení realizované jako závit antény, o polyethylenovou trubku, na kterou bude navinut vodič tvořící anténu, a propojovací vodič, který propojí přizpůsobovací člen a konektor antény.



Obr. 26: Model reálné antény pro $f=5,656\text{GHz}$

Model reálné antény jsem optimalizovala na maximální zisk a minimální hodnotu parametru S_{11} . Výsledkem je anténa s rozměry uvedenými v tabulce 1. Šířka pásma odečtená z grafu je $B=1,8\text{GHz}$, na kmitočtu $f=5,656\text{GHz}$ jsem odečetla parametr $S_{11}=-14,42\text{dB}$, zisk antény klesl na $G=4,67\text{dB}$, šířka hlavního laloku $\theta_{0,7}=68^\circ$ a úroveň postranních laloků jsem odečetla $-6,5\text{dB}$.



Obr. 27: Grafická závislost parametru S_{11} na kmitočtu pro $f=2,45\text{GHz}$

8.8 Zhodnocení návrhu

Optimalizovaná anténa pro $f=1,6\text{GHz}$ má velikosti jednotlivých částí vyšší než jsou navržené hodnoty. Optimalizovaná anténa při simulacích vykazuje podstatně vyšší zisk než udávají programy po výpočet.

Optimalizovaná anténa pro $f=2,45\text{GHz}$ má velikosti jednotlivých částí také vyšší než jsou navržené hodnoty. Optimalizovaná anténa také při simulacích vykazuje podstatně vyšší zisk než udávají programy po výpočet.

Optimalizovaná anténa pro $f=5,656\text{GHz}$ se velikostí liší od navržených parametrů nejméně, pouze v řádu milimetrů. U této antény jako u jediné jsem při optimalizaci dospěla ke zúžení obvodu antény. Tato anténa také jediná odpovídá velikostí zisku teoretickému návrhu.

Všechny antény se blíží více počítanému návrhu než návrhům realizovaným pomocí kalkulatorů. Od teoretického návrhu se nejvíce vzdaluje anténa pro kmitočet $f=5,656\text{GHz}$ a nejméně anténa pro $f=1,6\text{GHz}$. Návrh se tedy se stoupajícím kmitočtem stává méně přesným.

Optimalizace antén se členem impedančního přizpůsobení snížila zisk antény, rozšířila hlavní lalok vyzařovací charakteristiky a zvýšila úroveň postranních laloků. Návrh přizpůsobovacího obvodu simulace nepotvrdily, navržené přizpůsobení nemělo téměř žádnou účinnost, jeho rozměry proto byly pomocí výsledků simulací změněny. Konečné rozměry antén jsou v tabulce 1.

Zajímavý je úhel stoupání α , který je pro antény na kmitočty $f=1,6\text{GHz}$ a $f=2,45\text{GHz}$ výrazně vyšší než v literatuře doporučovaný úhel α .

Tabulka rozměrů optimalizovaných antén

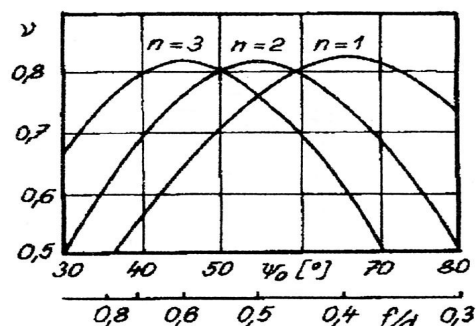
f [GHz]	1,6	2,45	5,66
Rozměry šroubovice			
N [-]	15	12	10
L [mm]	825	780	100
S [mm]	55	65	10,0
D [mm]	56	36	14
C [mm]	176	113	44
d [mm]	6	4	3
α [°]	17,4	29,9	12,8
l [mm]	184	130	45
Rozměry zemní desky			
D_z [mm]	200	200	100
L_z [mm]	3	3	3
Rozměry impedančního přizpůsobení			
l_z [mm]	234	189	37
S_z [mm]	55	65	10
t_l [mm]	0,4	0,5	0,5
w_l [mm]	0,5	0,5	0,2
t_2 [mm]	0,4	0,6	1,1
w_2 [mm]	1,3	0,5	1,0
Propojení antény a konektoru			
L_s	0,8	0,8	1,6
d_s [mm]	1,5	1,5	1,8
Rozměry polyethylenové trubky			
L_p [mm]	890	850	126
D_p [mm]	50	32	16

Tab. 1: *Rozměry optimalizovaných antén*

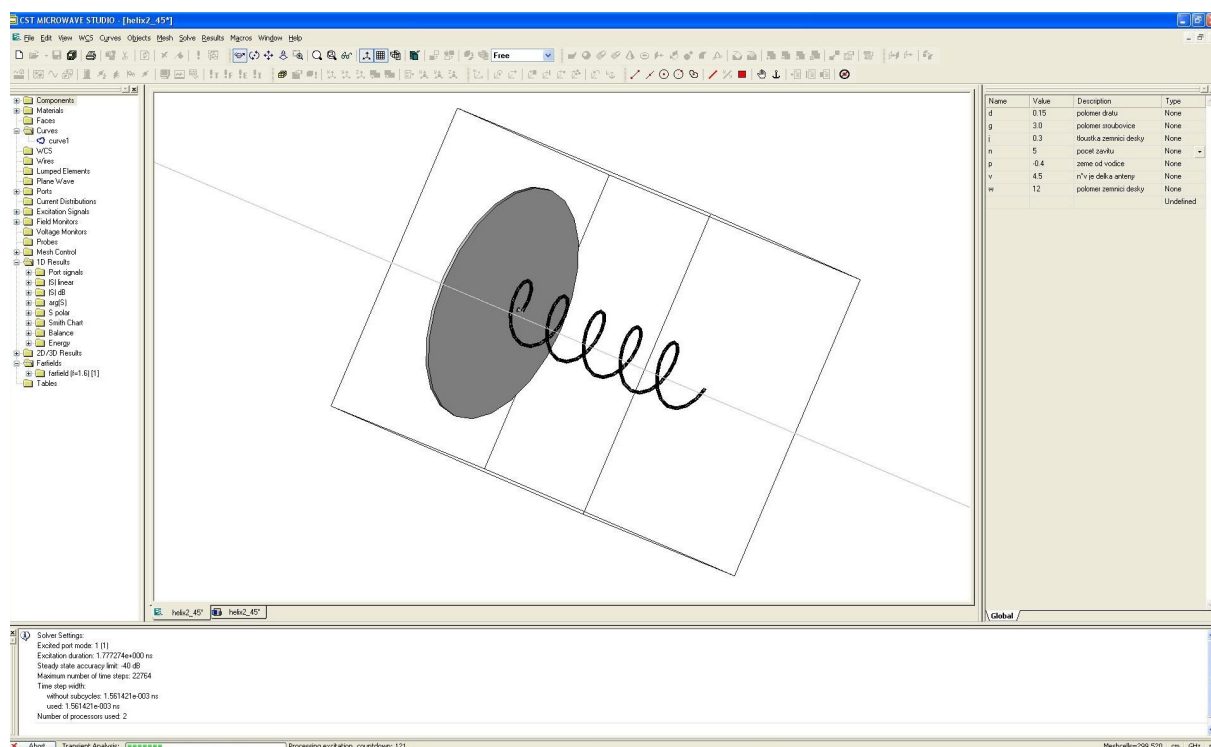
9 Návrh paraboly se šroubovicovým ozařovačem

9.1 Úprava a návrh antény pro $f=1,6\text{GHz}$

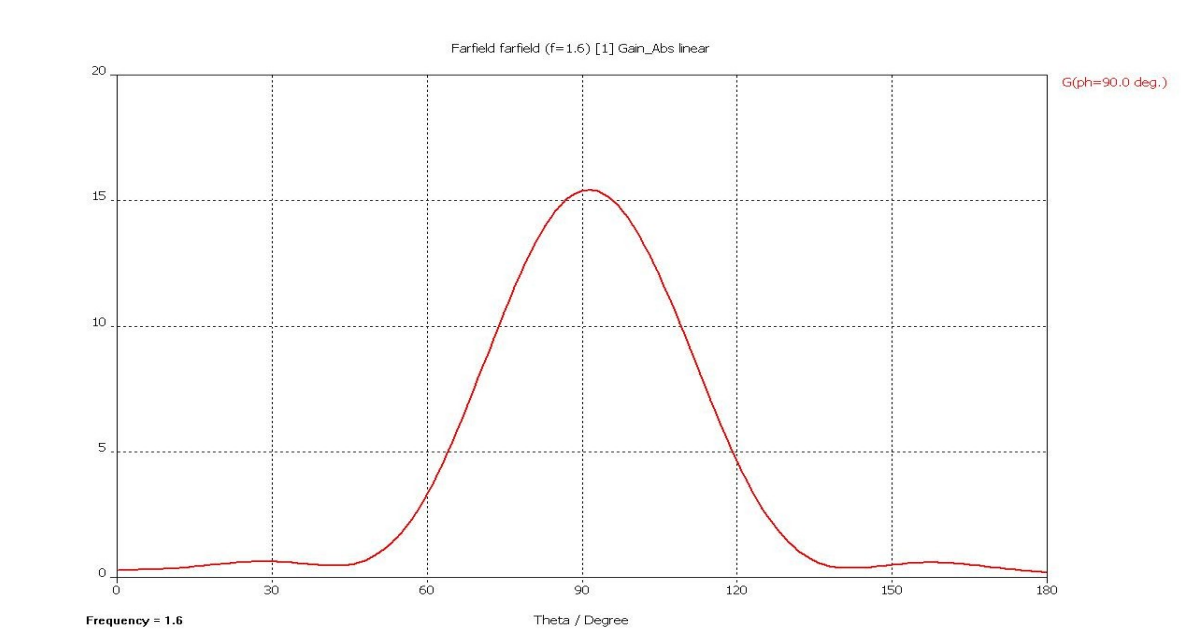
Protože ozařovač paraboly má být malý, zmenším počet závitů navržené antény na $N=5$. Tím dojde ke snížení zisku na hodnotu $G=15,4\text{dBi}$, úrovně postranních laloků na hodnotu $-13,8^\circ$ a šířky hlavního laloku na hodnotu $\Theta_{0,7} = 44^\circ$ [2].



Obr. 28: Využití ústí reflektoru, převzato z [2]



Obr. 29: Model antény



Obr. 30: Vyzařovací charakteristika antény

Z obrázku 30 odečtu pro $\psi_0 = 45^\circ$ a $n=1$ hodnoty $f_p/d_p=0,6$ a $v=0,65$. Vlnová délka je $\lambda=187,5\text{mm}$. Parabolu navrhnu pro zisk $G_p=30\text{dB}$.

Podle vzorce
$$G_p = v \left(\frac{\pi \cdot d_p}{\lambda} \right)^2 \quad (26)$$

se průměr reflektoru d_p určí

$$d_p = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{G_p}{v}} = \frac{0,1875}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{30}{0,65}} = 0,4057 \text{ m} = 405,7 \text{ mm} \quad (27)$$

Ohnisková vzdálenost paraboly je tedy

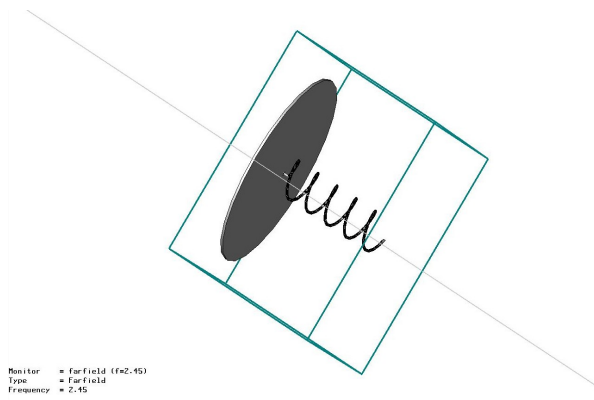
$$f_p = 0,6 \cdot d_p = 0,6 \cdot 0,4057 = 0,2434 \text{ m} = 243,4 \text{ mm} \quad (28)$$

Pro hloubku paraboly platí

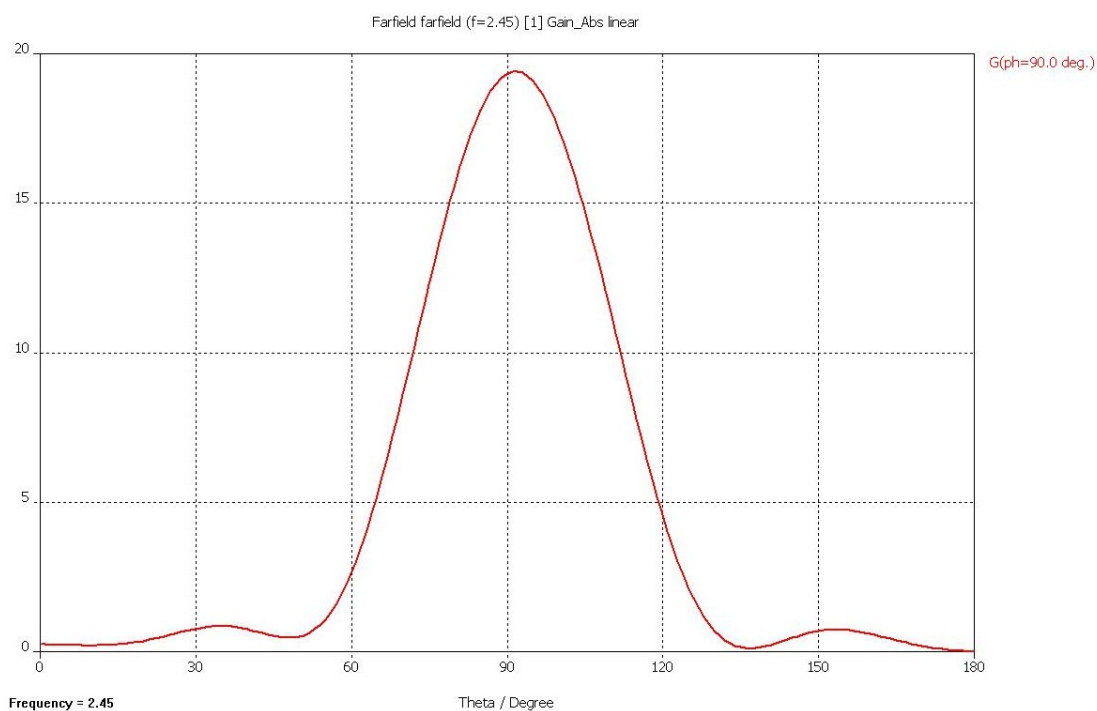
$$x = \frac{d_p^2}{16 \cdot f_p} = \frac{0,4057^2}{16 \cdot 0,2434} = 0,1736 \text{ m} = 173,6 \text{ mm} \quad (29)$$

9.2 Úprava a návrh antény pro $f=2,45\text{GHz}$

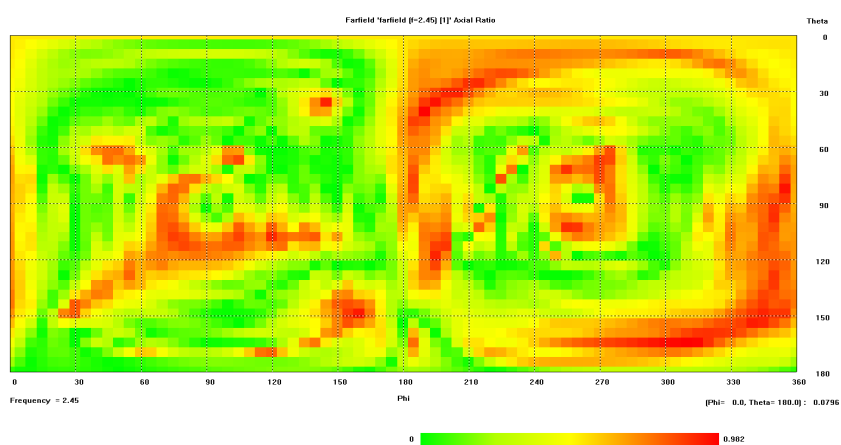
Při úpravě antény postupuji stejně jako u předchozí antény pro $f=1,6\text{GHz}$. Snížením počtu závitů na $N=5$ se zisk snížil na $G=19,4\text{dBi}$ a šířka hlavního laloku na $\Theta_{0,7} = 40,8^\circ$.



Obr. 31: *Model antény*



Obr. 32: *Vyzařovací charakteristika antény*



Obr. 33: *Poměr horizontálního a vertikálního vyzařování pro $f=2,45\text{GHz}$*

Z obrázku 32 odečtu pro $\psi_0 = 40^\circ$ a $n=1$ hodnoty $f_p/d_p=0,7$ a $v=0,55$. Vlnová délka je $\lambda=122,4\text{mm}$. Parabolou navrhnu pro zisk $G_p=30\text{dB}$.

Průměr reflektoru se d_p určí podle (27)

$$d_p = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{G_p}{v}} = \frac{0,1224}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{30}{0,55}} = 0,2879\text{ m} = 287,9\text{ mm} \quad .$$

Ohnisková vzdálenost paraboly je tedy podle (28)

$$f_p = 0,7 \cdot d_p = 0,7 \cdot 0,2879 = 0,2015\text{ m} = 201,5\text{ mm} \quad .$$

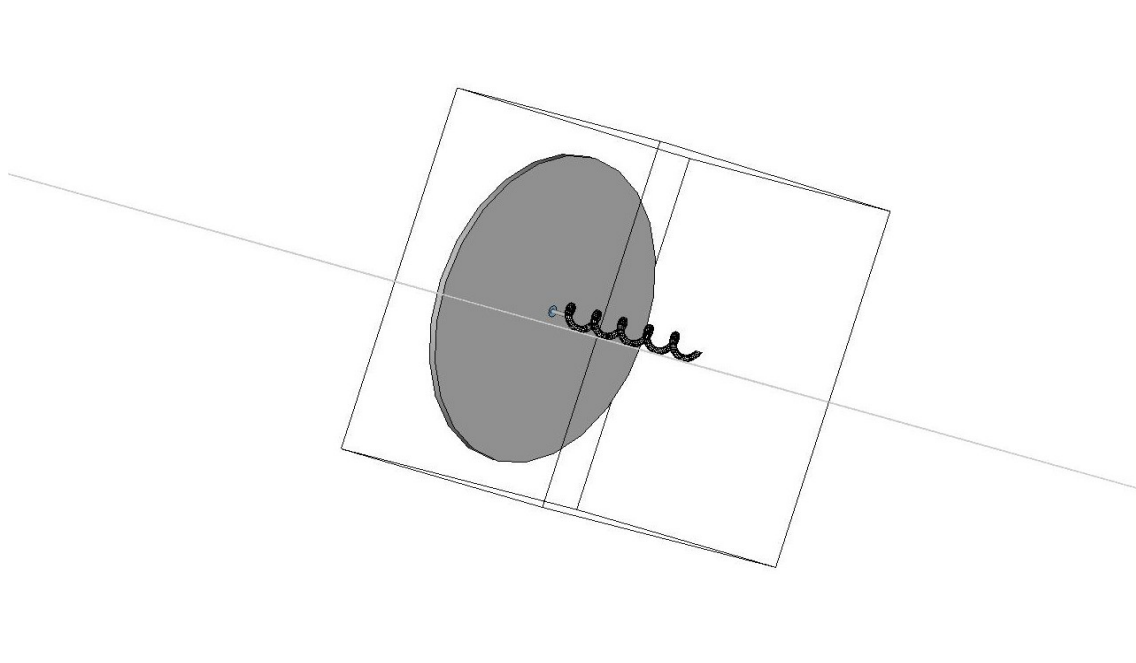
Pro hloubku paraboly platí (29)

$$x = \frac{d_p^2}{16 \cdot f_p} = \frac{0,2879^2}{16 \cdot 0,2015} = 0,1276\text{ m} = 127,6\text{ mm} \quad .$$

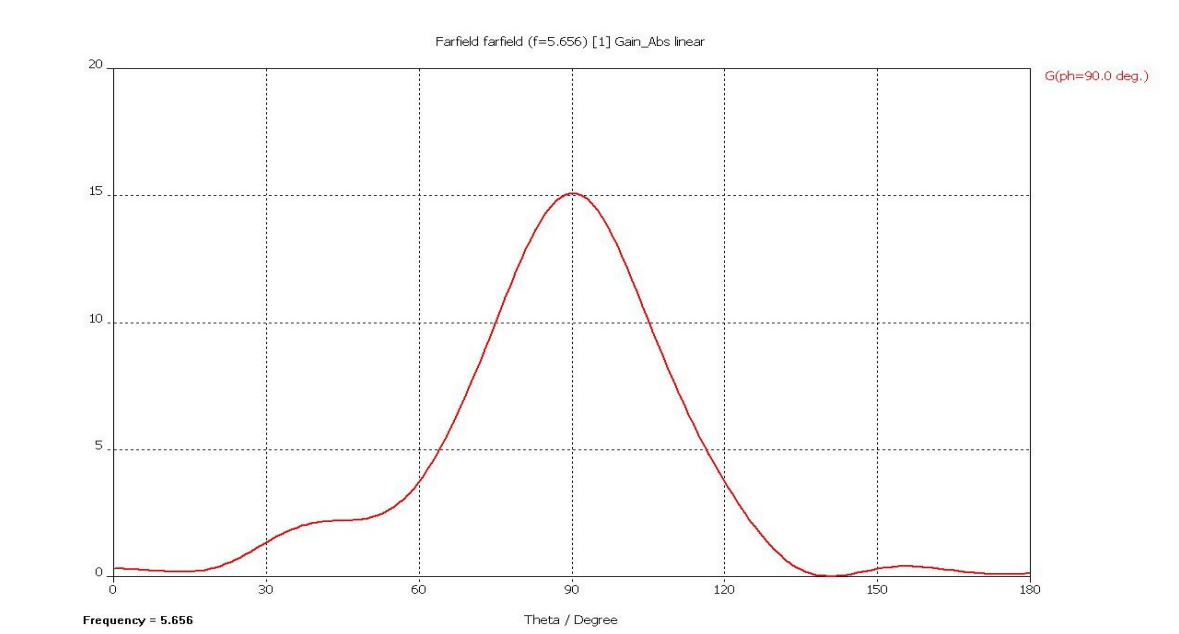
Pro anténu pro $f=2,45\text{GHz}$ jsou uvedena grafická vyjádření poměru horizontálního a vertikálního vyzařování. Hodnoty jsou v jednotkách decibel. Pokud se rovná poměr vyzařování v jednotlivých směrech 1, logaritmus se rovná 0 a polarizace je kruhová (na grafech zeleně vyznačeno). Pro anténu s počtem závitů $N=12$ je grafické vyjádření na obrázku 22 pro počet závitů $N=5$ na obrázku 33. Z grafů vyplývá, že polarizace se snížením počtu závitů zhorší jen málo. Pro ozařovač paraboly je podstatnější snížení zisku a rozevření hlavního laloku.

9.3 Úprava a návrh antény pro $f=5,656\text{GHz}$

Snížením počtu závitů na $N=5$ se zisk snížil na $G=15,1\text{dB}$ a šířka hlavního laloku se snížila na $\Theta_{0,7} = 40,2^\circ$.



Obr. 34: Model antény



Obr. 35: Vyzařovací charakteristika antény

Z obrázku 35 odečtu pro $\psi_0 = 50^\circ$ a $n=1$ hodnoty $f_p/d_p=0,55$ a $v=0,7$. Vlnová délka je $\lambda=53\text{mm}$. Parabolu navrhnu pro zisk 30dB.

Průměr reflektoru se d_p určí podle (27)

$$d_p = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{G_p}{v}} = \frac{0,053}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{30}{0,7}} = 0,1105 \text{ m} = 110,5 \text{ mm} \quad .$$

Ohnisková vzdálenost paraboly je tedy podle (28)

$$f_p = 0,55 \cdot d_p = 0,55 \cdot 0,1105 = 0,0608 \text{ m} = 60,8 \text{ mm} \quad .$$

Pro hloubku paraboly platí (29)

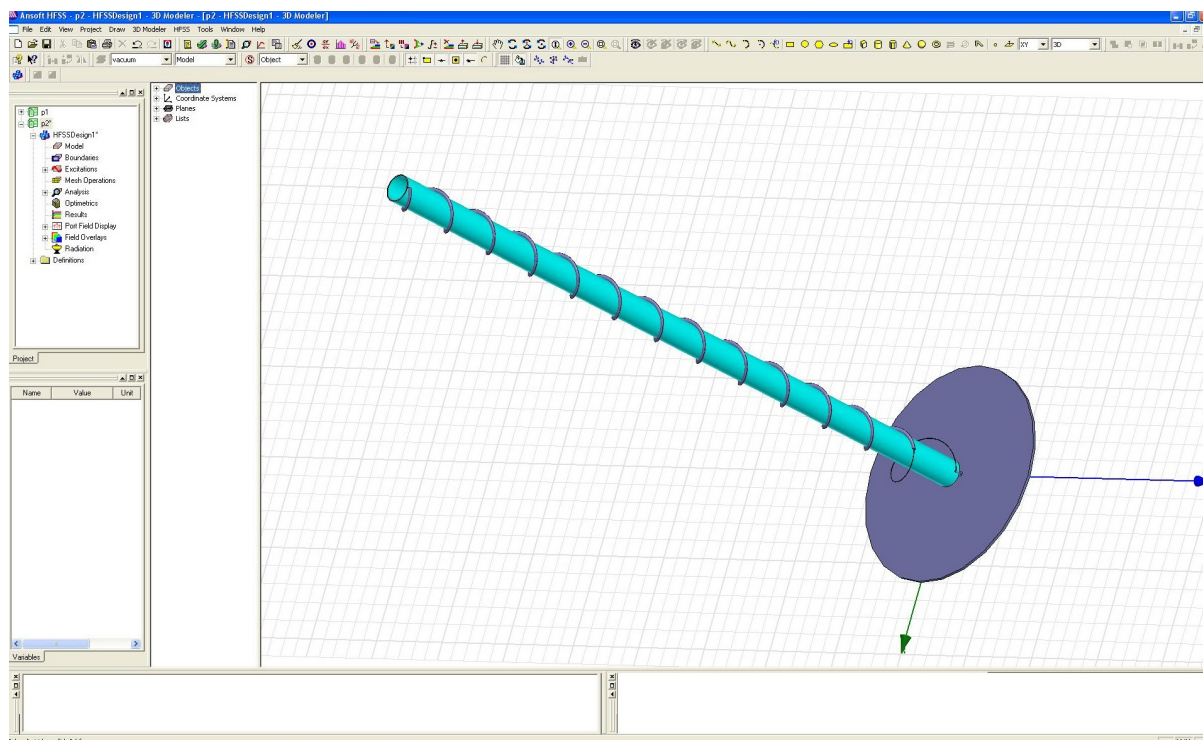
$$x = \frac{d_p^2}{16 \cdot f_p} = \frac{0,1105^2}{16 \cdot 0,0608} = 0,2064 \text{ m} = 206,4 \text{ mm} \quad .$$

10 Ověření návrhu

10.1. Ansoft HFSS

V programu společnosti Ansoft jsem vytvořila model antény. Program HFSS umožňuje stejně jako CST Microwave studio 3D zobrazení modelu, parametrické zadávání hodnot, využití několika různých osových systémů, a další. Na rozdíl od CST Microwave studia se v programu HFSS musí například pro analýzu vyzařovacích charakteristik umístit model do komory zadané uživatelem.

Program HFSS počítá analýzu metodou konečných koeficientů. Tato metoda je složitá a náročná na paměť. Proto je program spíše vhodnější na simulaci planárních struktur. Struktura šroubovicové antény, která je na obrázku 36, je bohužel příliš složitá. Simulace vyžadovala více paměti než měl počítač k dispozici a bohužel se simulace nepodařilo dokončit ani s modelem zjednodušeným, který nepokrýval zpětné vyzařování.



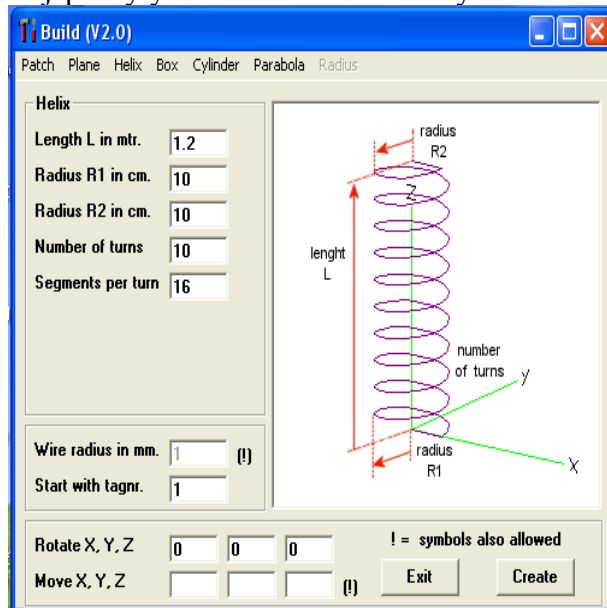
Obr. 36: Ukázka modelu v programu HFSS

10.2. 4nec2x

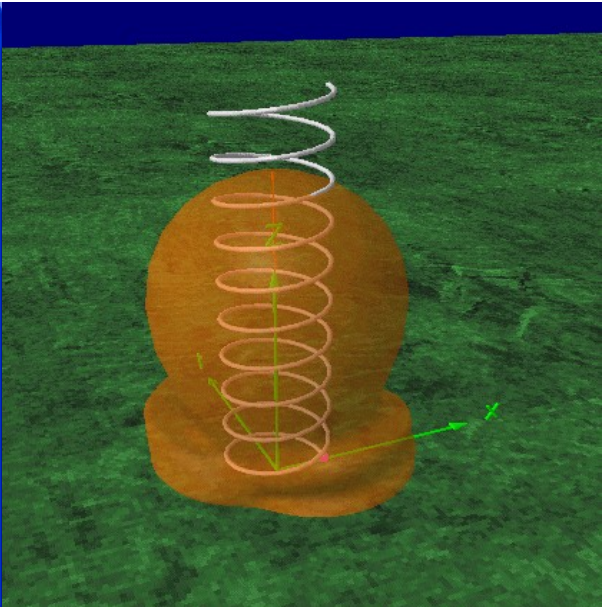
Program 4nec2x, jehož autorem je Arie Voors [23], vytváří model pomocí drátové konstrukce. Jeho součástí je builder, ve kterém je možné šroubovici přímo nadefinovat. Bohužel tento program umožňuje modelovat pouze kruhový drát daného průměru. Proto není možné v tomto programu ověřit funkci modelu antény s přizpůsobovacím obvodem ani vstupní parametry jeho návrhu odečtené z optimalizovaných antén. Lze potvrdit pouze teoretickou

hodnotu $R=140\Omega$ v blízkosti splnění podmínky $C \approx \lambda$.

Při realizaci modelu se vyskytla také chyba, při které builder chybně generoval šroubovici. Nejspíš byly důvodem malé rozměry modelu.



Obr. 37: Ukázka vytvoření modelu

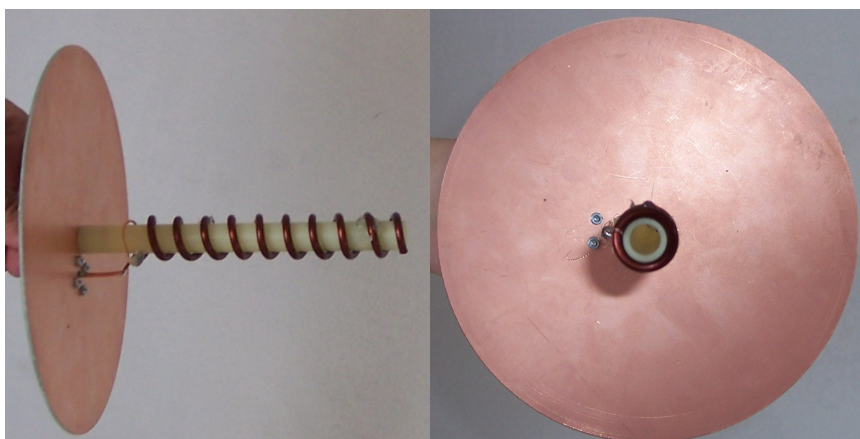


Obr. 38: 4net2x převzato z [23]

11 Měření reálných antén

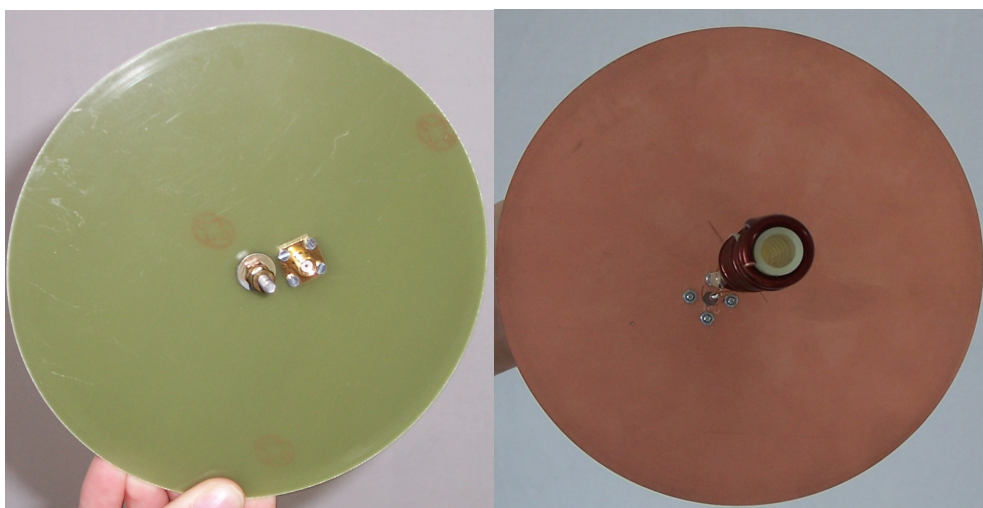
11.1 Realizace

Na pokyn vedoucího projektu jsem antény vyrobila. Antény jsou navinuty z měděného vodiče, pro anténu pro $f=5,656\text{GHz}$ je vodič pozinkovaný. Vodič pro anténu pro $f=1,6\text{GHz}$ byl pro nedostupnost nahrazen nejbližším možným vodičem o průměru $d=4,3\text{mm}$. Vodiče jsou navinuty na polyethylenových trubkách navržených průměrů. Zemní desky jsou vyrobeny z kuprextitu s poměděnou plochou. Na antény pro $f=1,6\text{GHz}$ a $f=2,45\text{GHz}$ jsem použila konektor NC 1462T, na anténu pro $f=5,656\text{GHz}$ jsem použila konektor SMA F PP.



Obr. 39: $f=5,656\text{GHz}$

Obr. 40: $f=5,656\text{GHz}$



Obr. 41: $f=5,656\text{GHz}$
Pohled na konektor

Obr. 42: $f=5,656\text{GHz}$
Pohled ze předu



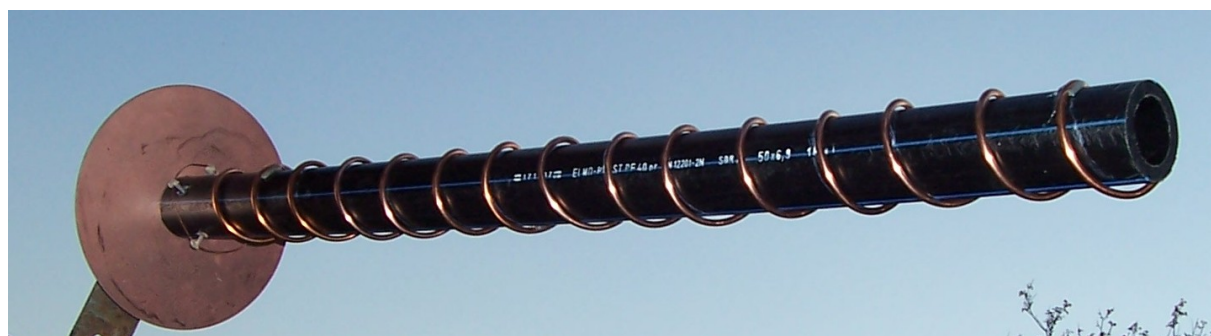
Obr. 43: $f=2,45\text{GHz}$



Obr. 44: $f=2,45\text{GHz}$
Konektor a uchycení



Obr. 45: $f=1,6\text{GHz}$
Konektor a uchycení

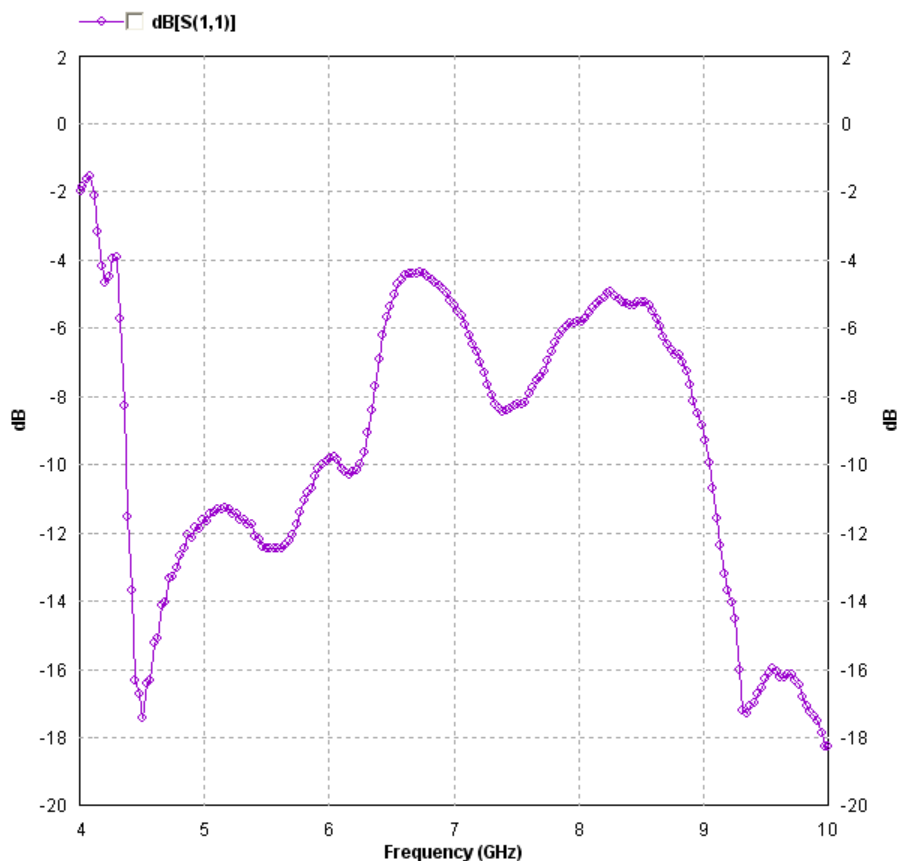


Obr. 46: $f=1,6\text{GHz}$

11.2 Měření

Měření antén proběhlo ve školní laboratoři na přístroji Agilent E8364B. Naměřené hodnoty jsou vyneseny v grafech pomocí programu Zeland.

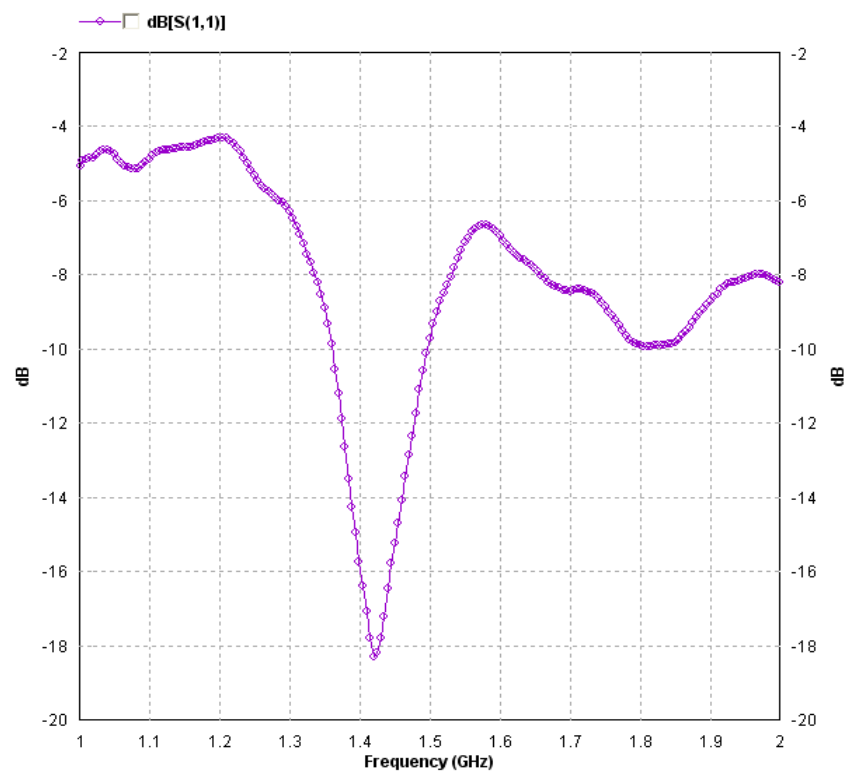
Anténa pro kmitočet $f=5,656\text{GHz}$ odpovídala odsimulovaným výsledkům, minimum se pouze posunulo na nižší kmitočty. Nejnižší hodnota $S_{11}=-17,45\text{dB}$ je na kmitočtu $f=4,51\text{GHz}$. Na kmitočtu $f=5,656\text{GHz}$ má parametr S_{11} hodnotu $S_{11}=-12,35\text{dB}$. Antény pro $f=1,6\text{GHz}$ a $f=2,45\text{GHz}$ odsimulovaným hodnotám neodpovídaly. Důvodem může být nepřesnost realizace oproti návrhu.



Obr. 47: Parametr S_{11} pro anténu pro $f=5,656\text{GHz}$

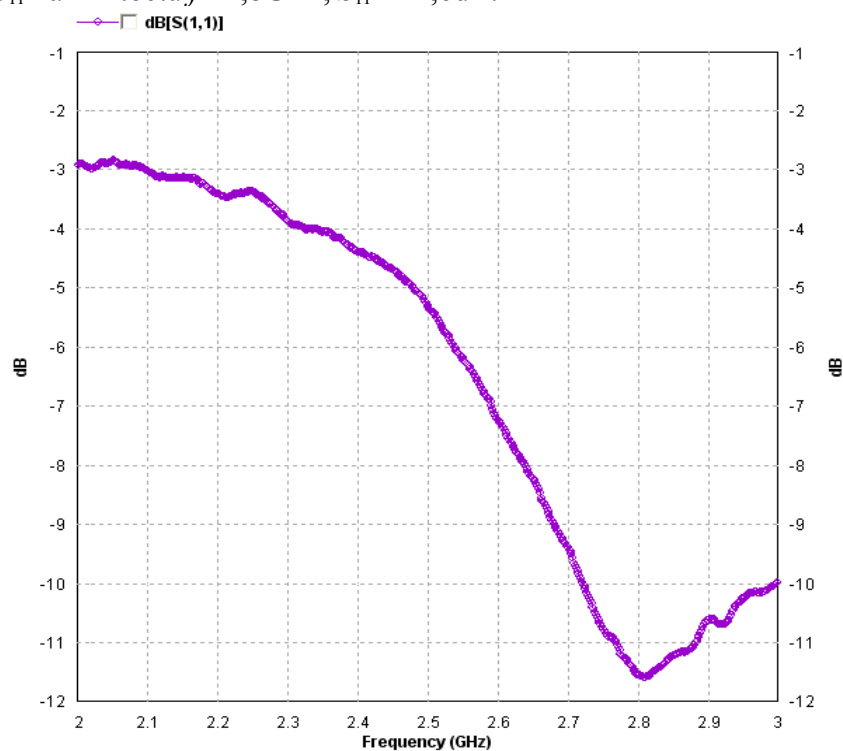
Pro impedanční přizpůsobení antén pro $f=1,6\text{GHz}$ a $f=2,45\text{GHz}$ jsem návrh změnila podle [15]. Pásek pro anténu $f=1,6\text{GHz}$ bude vysoký $t=0,2\text{mm}$, široký $w=5\text{mm}$ a dlouhý $l_z=281,3\text{mm}$. Pásek pro anténu $f=2,45\text{GHz}$ bude vysoký $t=0,2\text{mm}$, široký $w=1,5\text{mm}$ a dlouhý $l_z=28,3\text{mm}$.

Pro anténu $f=1,6\text{GHz}$ je na tomto kmitočtu hodnota $S_{11}=-6,95\text{dB}$. Minimální hodnotu má parametr S_{11} na kmitočtu $f=1,42\text{GHz}$, $S_{11}=-18,28\text{dB}$. Šířka pásma $B=180\text{MHz}$.



Obr. 48: Parametr S_{11} pro anténu pro $f=1,6\text{GHz}$

Pro anténu $f=2,45\text{GHz}$ je na tomto kmitočtu hodnota $S_{11}=-4,68\text{dB}$. Minimální hodnotu má parametr S_{11} na kmitočtu $f=2,8\text{GHz}$, $S_{11}=-11,6\text{dB}$.



Obr. 49: Parametr S_{11} pro anténu pro $f=2,45\text{GHz}$

12 Závěr

Během tří semestrů jsem se seznámila se základními vlastnostmi šroubovicových antén. Podle údajů z prostudované literatury jsem navrhla tři zadané šroubovicové antény. Teoretický návrh jsem si ověřila v dostupných programech. Hodnoty vypočtené z programů byly vyšší než hodnoty teoretického návrhu, což mohlo být způsobeno zaokrouhlováním ve výpočtech.

Seznámila jsem se s prostředím programu CST Microwave Studio a v tomto prostředí jsem vytvořila model antény pro simulace. Antény jsem optimalizovala na maximální zisk vyzařovaný hlavním lalokem při maximálním potlačení vedlejších laloků. Optimalizované antény byly svými parametry bližší vypočteným hodnotám než výsledkům získaným z kalkulátorů. Přesnější návrh měly antény pro nízké kmitočty.

Protože jedním z požadavků kladených na primární zářič parabolické antény jsou malé rozměry, antény jsem zkrátila na jednotný počet závitů $N=5$. Tyto paraboly jsem odsimulovala a z vyzařovací charakteristiky jsem pro každou odečetla šířku hlavního laloku pro pokles o 6dB (pokles na 0,5). Kruhová polarizace se oproti anténě s počtem závitů $N=12$ výrazně nezhoršila, hlavní lalok vyzařovací charakteristiky se rozšířil, což je žádoucí proto, aby anténa ozářila celou parabolu, ale s počtem závitů poklesl zisk antény. K těmto anténám jsem navrhla paraboly.

V programu LineGauge firmy Zeland jsem navrhla rozměry impedančního přizpůsobení pro teoretickou hodnotu impedance antén $R=140\Omega$. Reálné antény ale mají jiné impedance, takže rozměry přizpůsobení jsem navrhla pro každou anténu zvlášť.

Návrh impedančního přizpůsobení jsem odsimulovala a pomocí výsledků analýz optimalizovala na minimální hodnotu parametru S_{11} . Konečné hodnoty rozměrů antén jsou v tabulce 1.

Antény jsem vyrobila a na reálných anténách jsem proměřila parametr S_{11} . Naměřené hodnoty odpovídaly odsimulovaným pouze částečně. Odpovídala pouze anténa pro $f=5,656\text{GHz}$, jejíž realizace také nejpřesněji odpovídá modelu antény v programu. Pro ostatní antény jsem návrh změnila. Nové členy měly lepší výsledky, ale vykazovaly minimum parametru S_{11} na vedlejších kmitočtech. To může být způsobeno mechanickými nepřesnostmi výroby.

13 Literatura

13.1 Publikace

- [1] Johnson, R.C., Jasik, H.: *Antenna Engineering Handbook*, second edition, The Kingsport press, USA, 1984, ISBN 0-07-032291-0
- [2] Nováček, Z.: *Antény a šíření rádiových vln – cvičení a projekty*, Skriptum FEKT VUT v Brně, Brno 2002
- [3] Šimíček, B.: *Antény pro televizní a rozhlasové vysílání na VKV*, 1.vydání, Nakladatelství dopravy a spojů, Praha, 1990, ISBN 80-7030-095-7
- [4] Nováček, Z.: *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*, Skriptum FEKT VUT v Brně, Brno 2003
- [5] Procházka, M.: *Encyklopedická příručka*, 2. vydání, BEN – technická literatura, Praha, 2001, ISBN 80-7300-028-8
- [6] Bednařík, J., Český, M.: *Radio-elektronická příručka 2*, 1.vydání, nakladatelství ROH, Praha 1972

13.2 Elektronické zdroje

- [7] Mazánek, M., Bártík, H., Polívka, M.: *Anténní parametry* [online], rfprop team, 2003 [cit. 30.12.2007], dostupný z WWW: < http://www.rfprop.com/For_students/AS2/Cviceni/antenni_%20parametry.htm >
- [8] Nagy, V.: *ANTÉNY, ANTÉNY... 5* [online], CB klub Česká Lípa, 2002 [cit. 30.12.2007], dostupný z WWW: < <http://www.cbdx.cz/clanek99-anteny-anteny-5.htm> >
- [9] Davis, G.: *Axial Mode Helix Antenna Calculator* [online], CSG, Computer Support Group, Inc. and CSGNetwork.Com, 2007 [cit. 19.4.2007], dostupný z WWW: < <http://www.csgnetwork.com/antennahtcalc.html> >
- [10] Poisl, Z.: *Existuje anténa, která by byla nejlepší? (2.)* [online], Internet Info, s.r.o., 2005 – 2007 [cit. 30.12.2007], ISSN 1801-4933, dostupný z WWW: < <http://www.digizone.cz/clanky/existuje-antena-ktera-by-byla-nejlepsi-2/> >
- [11] *Helical Antennas* [online], Hastings Wireless, 2003 - 2007 [cit. 19.4.2007], dostupný z WWW: < <http://hastingswireless.homeip.net/index.php?page=antennas&type=helical> >
- [12] Crome, C.: *PHP Helical Antenna Calculator* [online], SourceForge.net, 2001 [cit. 19.4.2007], dostupný z WWW: < <http://www.wireless.org.au/~jhecker/stuff/Helix.php> >
- [13] den Besten, R.: *Helical/helix antenna cookbook recipe for 2.4 GHz wavelans and/or WiFi applications* [online], 2006 [cit. 19.4.2007], dostupný z WWW: < <http://helix.remco.tk/> >
- [14] Kuchař, M.: *Jak zapojíme síť - 3. část: bezdrátové sítě - Zisk, signál a pokrytí* [online], oXy Online s.r.o., 2005 [cit. 30.12.2007], ISSN 1213-0818, dostupný z WWW: < http://www.svethardware.cz/art_doc-6E26F87B6685C3F2C12570A600456195.html >
- [15] Ulcak, L.: *L – Band Helical antenna* [online], Applet.cz s.r.o., 2002 [cit. 19.4.2007], dostupný z WWW: < http://www.applet.cz/~ulcak/helical_antenna.htm >
- [16] Maršálek, A.: *Multifrekvenční ozařovač malé parabolické antény s kruhovou polarizací* [online], FEKT VUT v Brně, 2006 [cit. 30.12.2007], dostupný z WWW: < http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/ukazkove_prace/Marsalek/Marsalek.pdf >

- [17] Marek, J.: *Návrh ozařovače parabolické antény a předzesilovače v pásmu Ka* [online], FEKT VUT v Brně, 2006 [cit. 30.12.2007], dostupný z WWW:
< http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/ukazkove_prace/Marek/Marek.pdf >
- [18] Mikuláščík, K.: *Přijímací antény pro rozhlas a televizi* [online], LIMEMEDIA, a.s, 1999 – 2007 [cit. 30.12.2007], ISSN 1214-0279, dostupný z WWW:
< <http://www.radiotv.cz/radio-clanky/tisk/3140/prijimaci-anteny-pro-rozhlas-a-televizi.html> >
- [19] Linhart, R.: *Příruční slovníček Základů sdělovací techniky* [online], Západočeská univerzita v Plzni, 2007 [cit. 30.12.2007], dostupný z WWW:
< <http://home.zcu.cz/~rlinhart/zst/slovnicek.htm> >
- [20] Procházka, T., Bartoň, Z.: *S-parametry* [online], FEKT VUT v Brně, 2002 [cit. 30.12.2007], dostupný z WWW:
< <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02029/index.html> >
- [21] kolektiv dobrovolných přispěvatelů: *Wikipedia – The Free Encyclopedia* [online], nadace WIKIMEDIA, 2001 – 2007 [cit. 14.3.2007], dostupný z WWW:
< <http://www.wikipedia.org/> >
- [22] kolektiv dobrovolných přispěvatelů: *Zisk smerovost WiFi anten* [online], Pvfreet.net, o. s., 2007 [cit. 30.12.2007], dostupný z WWW:
< http://wiki.pvfreet.net/index.php/Zisk_smerovost_WiFi_anten >
- [23] Voors, A.: *4nec2x* [online], ICT Embedded, 2008 [cit. 10.5.2008], dostupný z WWW:
< <http://home.ict.nl/~arivoors/> >

14 Seznam použitých zkratek a symbolů

A	Normalizační koeficient
AE	Poloměr kruhové polarizace
AR	Osový poměr
B	Šířka pásma
c	Rychlost světla ($c=3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$)
C	Obvod šroubovice
D	Průměr šroubovice (mezi středy vodičů)
d	Průměr vodiče
D_{max}	Směrovost
D_p	Průměr polyethylenové trubky
d_p	Průměr reflektoru
d_s	Průměr propojky
D_z	Průměr zemní desky
E	Vektor intenzity elektrického pole
$E(\theta)$	Výkon antény v jednotlivých směrech (vyzařovací diagram)
E_x	Složka vektoru intenzity el. pole ve směru osy x
E_y	Složka vektoru intenzity el. pole ve směru osy y
f	Frekvence
f_p	Ohnisková vzdálenost
G	Zisk
G_p	Zisk paraboly
H	Vektor intenzity magnetického pole
I_{vst}	Vstupní proud
L	Osová délka
l	Délka jednoho závitu
L_p	Délka polyethylenové trubky
L_s	Výška propojky
L_z	Tloušťka zemní desky
l_z	Délka čtvrtvlnného transformátoru
N	Počet závitů
p	Fázová rychlost
P_Σ	Vyzařovaný výkon
PSV	Poměr stojatých vln
P_{ztr}	Ztrátový výkon
Q	Účinnost
R	Odpor
$R_{\Sigma vst}$	Odpor záření
R_{vst}	Reálná část vstupního odporu
R_{ztr}	Ztrátový odpor
S	Vzdálenost mezi závity
S_{II}	Rozptylový parametr
S_p	Plošný obsah apertury
S_z	Výška závitu impedančního přizpůsobení
t	Výška členu impedančního přizpůsobení
t_l	Výška členu impedančního přizpůsobení u antény

t_2	Výška členu impedančního přizpůsobení u konektoru
v	Rychlost šíření vlny podél šroubovice
w	Šířka členu impedančního přizpůsobení
w_1	Šířka členu impedančního přizpůsobení u antény
w_2	Šířka členu impedančního přizpůsobení u konektoru
x	Hloubka paraboly
X_{vst}	Imaginární část vstupního odporu
Z_1	Vstupní impedance
Z_2	Výstupní impedance
Z_{ov}	Charakteristická impedance
Z_t	Impedance transformátoru
α	Úhel stoupání vodiče
δ	Fáze mezi závity
η	Účinnost
θ	Úhel měření od osy
ω	Úhlová rychlost
$\Theta_{0,7}$	Šířka hlavního laloku pro pokles o 3dB
λ	Vlnová délka
π	Ludolfovo číslo
ψ	Koeficient záření
ψ_0	Úhlová apertura